

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіоелектроніки
Факультет комп'ютерних наук та технологій
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти (освітній ступінь))

на тему КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ
ВНУТРІШНІХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Виконав: студент 2 курсу, групи КНТз-511м
спеціальності _____

123 «Комп'ютерна інженерія»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація) _____

«Комп'ютерні системи та мережі»

Касьян Костянтин Миколайович

(прізвище та ініціали)

Керівник Скрупський С.Ю.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Єфименко М.В.

(прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя
2022 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет інформатики та радіоелектроніки, комп'ютерних наук і технологій
 Кафедра «Комп'ютерні системи та мережі»
 Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) магістерський
 Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Комп'ютерні системи та мережі
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Кудерметов Р.К.

“ ” 2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Касьяну Костянтину Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Комп'ютерна система діагностування внутрішніх параметрів технічних систем

керівник проекту (роботи) Скрупський Степан Юрійович, к. т. н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “07” листопада 2022 року № 367



2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) наявні методи та алгоритми виявлення несправностей в технічних системах, виявлення несправностей рівня параметру математичної моделі діагностуємої системи, похибка визначення параметрів, що діагностуються не більше 5%

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз технічного завдання; дослідження предметної області; розробка діагностичної моделі та методу діагностування параметрів елементів технічних систем; розробка структурної схеми, алгоритму функціонування системи діагностування та її програмна реалізація; експериментальне дослідження з оцінки точності розроблених методів, моделей, алгоритмів та програмного забезпечення

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Плакат 1 – Постановка завдання дипломної роботи, Плакат 2 – Метод автоматизованого діагностування та алгоритм забезпечення діагностовності системи, Креслення 1 – Алгоритм діагностування внутрішніх параметрів технічних систем, Плакат 3 – Структура та склад комп'ютерної системи діагностування, Плакат 4 – Експериментальна перевірка результатів роботи

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

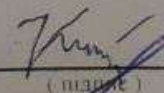
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	приймав виконання завдання
1-4	Скрупський С.Ю., к. т. н., доцент		
Нормоконтроль	Щербак Н.В., ст. викл.		

7. Дата видачі завдання 01.10.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	07.10.2022 р.	
2	Дослідження предметної області	14.10.2022 р.	
3	Розробка методу діагностування та діагностичної математичної моделі	21.10.2022 р.	
4	Розробка структури системи	28.10.2022 р.	
5	Розробка алгоритму роботи системи	05.11.2022 р.	
6	Реалізація системи діагностування	12.11.2022 р.	
7	Дослідження системи діагностування	19.11.2022 р.	
8	Оформлення пояснювальної записки	26.11.2022 р.	
9	Оформлення графічної частини	01.12.2022 р.	


Студент


(ініціали)

К.М. Касьян

(ініціали та прізвище)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

С.Ю. Скрупський

(ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 100 с., 18 рис., 15 табл., 58 посилань, 2 додатки.

ВНУТРІШНІЙ ПАРАМЕТР, ГРАНИЧНО-ДОПУСТИМЕ ЗНАЧЕННЯ, ДЕФЕКТ, ДІАГНОСТИЧНА МОДЕЛЬ, ДІАГНОСТУВАННЯ, ЕЛЕМЕНТ СИСТЕМИ, КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА, МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ, РЕЖИМ РОБОТИ, ТЕХНІЧНА СИСТЕМА, ЦІЛЬОВА ФУНКЦІЯ

Мета магістерської роботи полягає у розробці та дослідженні комп'ютерної системи, яка виконувала б діагностування технічного стану системи шляхом визначення значень її внутрішніх параметрів за результатами вимірів її вихідних характеристик та подальшого порівняння їх з граничнодопустимими значеннями, і тим самим підвищувала надійність діагностуємої системи.

В першому розділі показана актуальність теми дипломної роботи, проаналізовані існуючі методи діагностування елементів в технічних системах, сформульована ціль та поставлені завдання дипломної роботи.

В другому розділі наводиться розроблені діагностична модель та метод діагностування параметрів елементів системи, заснований на отриманні дійсних значень параметрів та режимів роботи елементів розрахунковим шляхом на основі експериментально отриманих вихідних характеристик системи із застосуванням методу оптимізації та порівняння їх з допустимими.

У третьому розділі наведено розроблену структурну схему та алгоритм функціонування системи діагностування, виконано програмну реалізацію системи.

У четвертому розділі наведено експериментальні дослідження з оцінки точності розроблених методів, моделей, алгоритмів та програмного забезпечення.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналіз проблеми діагностування параметрів елементів технічних систем	9
1.1 Дослідження характеру та передумов виникнення дефектів технічних систем у вигляді виходу дійсних значень параметрів та режимів роботи їх елементів за допустимі межі	9
1.2 Аналіз існуючих методів діагностування технічних систем	12
1.3 Постановка завдання дипломної роботи	25
1.4 Висновки за розділом 1.....	29
2 Розробка методу діагностування внутрішніх параметрів технічних систем	30
2.1 Вимоги до методу діагностування внутрішніх параметрів технічних систем	31
2.2 Метод діагностування внутрішніх параметрів технічних систем	32
2.3 Діагностична математична модель	35
2.4 Розробка алгоритму забезпечення діагностовності технічної системи на стадії її проектування	41
2.5 Розробка алгоритму діагностування внутрішніх параметрів технічних систем	47
2.6 Висновки за розділом 2.....	52
3 Розробка комп'ютерної системи діагностування внутрішніх параметрів технічних систем	53
3.1 Вимоги до комп'ютерної системи діагностування.....	54
3.2 Розробка структурної схеми та алгоритму функціонування комп'ютерної системи діагностування	55
3.3 Розробка алгоритму функціонування програмних модулів комп'ютерної системи діагностування	62

3.4 Програмна реалізація системи діагностування	68
3.5 Висновки за розділом 3.....	73
4 Експериментальна перевірка результатів роботи	74
4.1 Експериментальна перевірка на прикладі пасивного фільтра	74
4.2 Експериментальна перевірка на прикладі підсилювача проміжної частоти	78
4.3 Висновки за розділом 4	91
Висновки.....	92
Перелік посилань.....	94
Додаток А.....	101
Додаток Б.....	103
Перелік графічних матеріалів:	
Плакат 1 –Постановка завдання дипломної роботи	
Плакат 2 –Метод автоматизованого діагностування та алгоритм забезпечення діагностовності системи	
Креслення 1 –Алгоритм діагностування внутрішніх параметрів технічних систем	
Плакат 3 –Структура та склад комп’ютерної системи діагностування	
Плакат 4 – Експериментальна перевірка результатів роботи	

ВСТУП

Технічна система (ТС) - це штучно створена сукупність елементів і відношень (зв'язків) між ними, які утворюють цілісну структуру об'єкта, що має властивості, які не зводяться до властивостей елементів і призначена для виконання корисних функцій [1].

До технічних систем відносять пристрої, прилади, механізми, машини, комплекси обладнання, будівельні конструкції і споруди, технологічні операції і процеси, телекомунікаційні системи, комп'ютерні системи, автоматизовані системи управління технологічними процесами тощо.

Саме для технічних систем за багато останніх десятиліть розроблений потужний арсенал математичних моделей та методів математичного моделювання фізичних та інформаційних процесів, що в них протікають. Відповідно, створені та широко використовуються і системи автоматизованого проектування (САПР), що дозволяють проектувати апаратуру практично будь-якої складності.

Надійність будь-якої технічної системи, визначається якістю її розробки, забезпечується в процесі виготовлення та підтримується в процесі експлуатації. Неможливість створення абсолютно надійних виробів робить актуальним дослідження, розробку й застосування принципів, способів, методів і засобів, що підвищують надійність шляхом вчасного виявлення та усунення відмов апаратури. До основних способів попередження відмов технічних систем відносять ефективний контроль і діагностування їхнього технічного стану. Вчасне виявлення й усунення дефектів підвищує ймовірність безвідмовної роботи та витрати на експлуатацію контрольованих об'єктів.

Використання сучасних методів діагностування технічних систем дозволяє контролювати параметри та характеристики системи як на етапі її виготовлення, так і на етапі її експлуатації. При цьому глибина контролю може змінюватись в залежності від призначення системи. У деяких випадках достатньо

контролювати лише вихідні характеристики системи. У той самий час для систем з підвищеними вимогами до надійності, про критичних систем, необхідно поруч із вихідними характеристиками системи контролювати і параметри її елементів, тобто внутрішні параметри системи.

Необхідність контролю значень параметрів елементів та їх режимів роботи і діагностування на основі цього технічного стану апаратури паралельно зі зростанням можливостей комп'ютерної техніки призводить до того, що останнім часом здійснюються спроби розробки теоретичних методів та програмного забезпечення для автоматизації цього процесу. При цьому переважають програми, які орієнтовані на автоматизацію процесу контролю виключно вихідних характеристик апаратури та її функціональних вузлів.

В той же час однією з основних причин відмов технічних систем при їх експлуатації є відхилення під дією зовнішніх факторів реальних значень параметрів елементів та їх режимів роботи від номінальних значень, закладених при проектуванні. Коли за результатами діагностування будь-який один або кілька внутрішніх параметрів системи виходять за свої граничнодопустимі межі констатується наявність дефекту. Якщо ж будь-який внутрішній параметр системи ще не досяг свого граничнодопустимого значення, але поступово наближається до нього, можна говорити про потенційну аномалію функціонування та можливо незабаром дефект. У такому разі необхідно спрогнозувати ситуацію, щоб передбачити поведінку параметра та вжити заходів заздалегідь, не допустивши виходу параметра за допуски.

Таким чином, актуальною та важливою є розробка та реалізація методу діагностування, покликаною за вимірними значеннями контрольованих вихідних характеристик системи, оцінювати значення параметрів її елементів та на основі порівняння їх із граничнодопустимими значеннями, діагностувати технічний стан системи. Безумовно, такий підхід є більш ефективним, але й більш вимогливим як з точки зору розробки відповідної методичної бази процесу діагностування, так і з точки зору математичного забезпечення, програмної реалізації та обчислювальних ресурсів.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Дослідження характеру та передумов виникнення дефектів технічних систем у вигляді виходу дійсних значень параметрів та режимів роботи їх елементів за допустимі межі

Забезпечення високих показників якості та надійності технічних систем неможливе без застосування різноманітних методів та засобів діагностування як на етапі їх виготовлення, так і на етапі експлуатації. На кожній технологічній операції виготовлення можуть з'являтися дефекти, що призводять до порушення працездатності системи.

Виникнення дефектів на стадії виробництва системи обумовлено помилками в конструкторській та технологічній документації, наявністю на підприємстві статистичних методів входного контролю елементів, порушенням технологічного процесу підготовки елементів до збирання, порушенням умов зберігання та транспортування елементів, порушенням технологічного процесу виготовлення системи, кваліфікацією та психофізіологічним станом виробничого персоналу та іншими причинами.

На прикладі електронних систем рисунку 1.1 представлена узагальнена діаграма відносного розподілу дефектів, виявлених під час перевірки друкованих вузлів [2].

Розкид у розподілі дефектних систем 10-30% та самих дефектів обумовлюється складністю системи, кваліфікацією виробничого персоналу, типом виробництва, станом технологічного устаткування, ступенем автоматизації технологічного процесу, наявністю на підприємстві автоматизованого устаткування входного контролю елементів тощо.

Своєчасно невиявлені дефекти на наступних етапах технологічного циклу можуть спричинити появу вторинних ще більш "дорогих" дефектів.

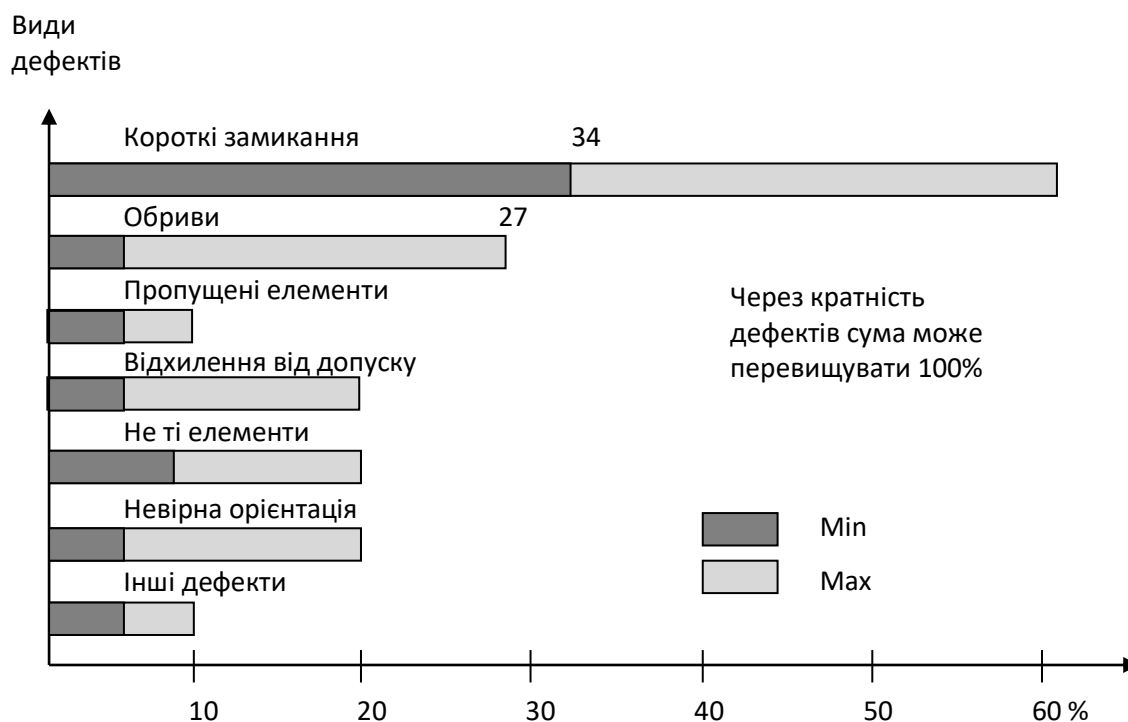


Рисунок 1.1 - Узагальнена діаграма відносного розподілу дефектів в електронних пристроях

Дорогими є також приховані дефекти, які зазвичай виявляються або на періодичних випробуваннях відібраної партії продукції, або при експлуатації. Прикладами прихованих дефектів в електронних системах можуть бути невстановлені захисні діоди, не відповідний опір обмежувальних резисторів і т.д.

Процес пошуку виробничих дефектів є дуже трудомістким. Зазвичай до налагодження складних електронних систем та блоків залучаються кваліфіковані фахівці, які здійснюють налагодження, ґрунтуючись на своєму досвіді та інтуїції. Зі зростанням складності та збільшенням випуску систем такий підхід стає малоефективним, а найчастіше дає негативні результати. Наприклад, у деяких випадках наладчик, не знайшовши дефекту, досягає задовільних вихідних характеристик за допомогою підбору інших номіналів елементів або регулювання, що не відповідає технології, тобто замість усунення одних дефектів у схему вносяться нові. В результаті погіршуються надійність та якість системи, а також скорочується термін її служби.

Не менш важливо контролювати параметри елементів вже під час експлуатації системи, коли вірогідність відхилень їх значень під впливом зовнішніх факторів (температура, радіація і т.і.) та часу експлуатації суттєво збільшується.

Важливість оцінки електричних режимів роботи елементів при перевірці правильності їх застосування відображають відомі статистичні дані про найбільш характерні причини відмов елементів. Наприклад, на рисунку 1.2 наведено діаграму розподілу причин відмов напівпровідникових приладів у бортових РЕЗ, з якої видно, що частка відмов, пов'язаних з порушенням електричних режимів роботи напівпровідникових приладів (НП), становить приблизно 40-45% від загальної кількості відмов напівпровідникових приладів в експлуатації.

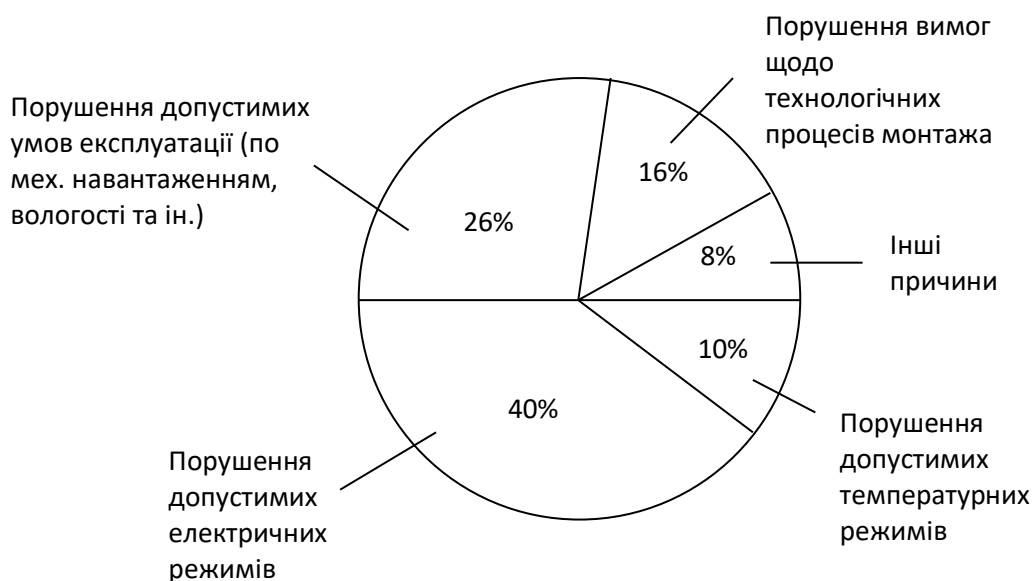


Рисунок 1.2 - Розподіл причин відмов НП в бортових РЕЗ (без врахування відмов, пов'язаних з дефектами НП)

Підвищена чутливість до зміни електричних режимів особливо характерна для НП. За даними [3] інтенсивність їх відмов збільшується в середньому від 2 до 10 разів при збільшенні коефіцієнта електричного навантаження від 0.5 до 1. Напівпровідникові активні компоненти виходять з ладу навіть при короткочасних навантаженнях, що вимірюються мікросекундами [4].

Зі зростанням складності систем зростає і трудомісткість аналізу режимів роботи елементів. У той самий час, зі зростанням трудомісткості аналізу та відповідним зростанням інтенсивності потоку аналізованої інформації починає позначатися обмежена здатність людини переробляти цю інформацію [5] , що ілюструється якісним графіком, наведеним на рисунку 1.3.

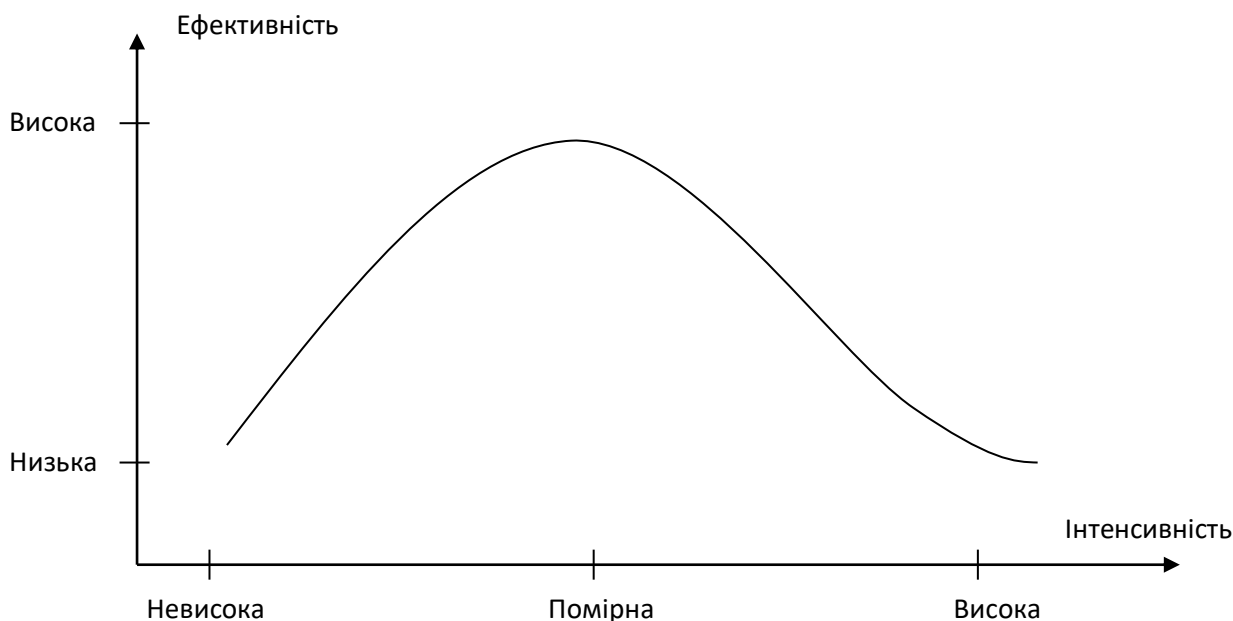


Рисунок 1.3 – Залежність ефективності роботи людини від інтенсивності оброблюваної інформації

Отже, більшість порушень пов'язані з недосконалістю методології оцінки режимів роботи елементів, її невідповідністю складності сучасних систем, що породжує високу загальну трудомісткість оцінки.

1.2 Аналіз існуючих методів діагностування технічних систем

Управління станом складних систем завжди пов'язане з необхідністю отримання інформації про цей стан та його цілеспрямованих та хаотичних змінах.

Процес визначення технічного стану об'єкта з певною точністю зветься - технічне діагностування [6,7,8]. Цей процес реалізується в системі технічного діагностування, що містить сукупність засобів, об'єкта діагностування та виконавців, підготовлених до проведення діагностування за певними методами та правилами.

Аналіз літературних джерел [9,10,11,12] показує, що традиційні процеси діагностування технічних систем ґрунтуються на наступних методах:

1) Метод аналізу монтажу, який дозволяє, використовуючи органи чуття людини (зір, слух, дотик, нюх), знайти місце знаходження дефекту за такими признаками:

- згорілий елемент, неякісне з'єднання, тріщина, дим, іскріння та ін;
- різні звукові ефекти ("писк", "цикання" та ін);
- перегрів елемента;
- запахи елементів, що згоріли.

2) Метод вимірів, заснований на використанні вимірювальних приладів.

3) Метод зовнішніх проявів, заснований на високій інформативності штатних індикаторів, за якими можна з певною мірою ймовірності судити про справність системи, а також орієнтовно визначити групу елементів, серед яких може бути несправний.

Перелічені методи належать до пасивних. Більш широкими можливостями мають активні методи, пов'язані з маніпуляціями, що здійснюються ремонтником. До них належать такі методи:

1) Метод заміни, заснований на заміні сумнівного елемента чи модуля свідомо справним. Якщо після такої заміни зовнішній прояв дефекту зник, то вважають, що дефект усунений.

2) Метод виключення, який заснований на тимчасовому від'єднанні (при можливому витокі або пробої) або перемиканні виводів (при можливому обриві) сумнівних елементів.

3) Метод впливу, який заснований на аналізі реакції схеми на різні маніпуляції: зміна положення движків змінних резисторів, зміна напруги мережі живлення та інші маніпуляції.

4) Метод електропрогону, що полегшує пошук дефектів, які періодично проявляються і що дозволяє перевірити якість виконаного ремонту.

5) Метод простука, який дозволяє виявити дефекти монтажу (на увімкненому пристрої) шляхом похитування елементів, посмикування за провідники, простукуванням по шасі та ін.

6) Метод еквівалентів, заснований на тимчасовому від'єднанні частини схеми та заміні її сукупністю елементів, що на неї надають таку ж дію. Подібними ділянками схеми, як правило, можуть бути генератори імпульсів, допоміжні джерела постійної напруги, еквіваленти навантажень.

Недоліком цих методів є низька ефективність, що виявляється особливо при серійному та масовому виробництві при великих кількостях діагностованих елементів. Їх невисока достовірність пов'язана із суб'єктивністю оцінок того чи іншого стану системи. Крім того, при ручних методах діагностування неможлива перевірка системи у складних динамічних режимах, у яких вона експлуатуватиметься у реальній ситуації.

Все це призвело до необхідності розробки методів та засобів автоматизації перевірок систем у процесі їх виробництва та експлуатації. Однак, якщо питанням контролю працездатності присвячено ряд теоретичних робіт та практичних реалізацій [9,13,14], то питанням діагностування чи контролю справності технічних систем приділялося недостатньо уваги.

Завдання виявлення місця виникнення несправності на прикладі електричних кіл технічних систем може бути надзвичайно складним. Причина полягає в труднощах вимірювання струмів безпосередньо у схемі (без розриву з'єднань), відсутності хороших моделей несправностей аналогових компонентів типу моделей виявлення несправностей по константному "0" та по константній "1", які широко використовуються при перевірці цифрових схем, а також у нелінійному характері завдання. Якщо, наприклад, величина параметра

змінюється у кілька разів, значення вихідних сигналів у те ж саме число разів не змінюється, тобто зв'язок між вихідними сигналами кола і параметрами його компонентів нелінійний, хоча при цьому саме коло може бути й лінійним.

У загальному випадку під несправністю розуміється така зміна параметра елемента відносно його номінального значення, що може викликати відмову всій системи. Розрізняються катастрофічні (жорсткі) несправності, коли несправний елемент стає причиною короткого замикання або розриву кола, та несправності типу відхилень або поступові (м'які) несправності, коли параметр несправного елемента відхиляється від номіналу. М'які несправності можуть бути результатом технологічних допусків, старіння чи паразитних впливів. Більшість методів виявлення несправностей відноситься до випадку, коли несправність обумовлена зміною лише одного параметра. Таку несправність називають одиночною. Насправді можуть мати місце множинні несправності, тобто одночасна зміна кількох параметрів. Сучасні методи призначені до розгляду саме цього важкого випадку.

Для класифікації методів виявлення місця несправностей можна використати кілька критеріїв. Найбільш поширена класифікація, заснована на ототожненні тієї стадії процесу перевірки, на якій здійснюється моделювання кола, що перевіряється [15]. Зокрема, можна виділити процедури моделювання до перевірки та процедури моделювання після перевірки. На рисунку 1.4 представлені різні методи виявлення несправностей класифіковані згідно з цим способом.

При практичному застосуванні методів виявлення несправностей потребує уваги цілий ряд їх характеристик. Основні з них: вимоги до оперативних обчислень, вимоги до автономних обчислень, тестові точки, типи несправностей, типи схем, моделі схем, глибина діагностики, робастність та можливість перевірки у робочому режимі.

1) Вимоги до оперативних обчислень.

В оптимальному методі обсяг оперативних обчислень має бути мінімальним. Це означає, що процес моделювання після перевірки повинен

здійснюватись швидко, а необхідні обчислення мають бути простими, що безпосередньо визначає розміри витрат на перевірку та швидкість перевірки.

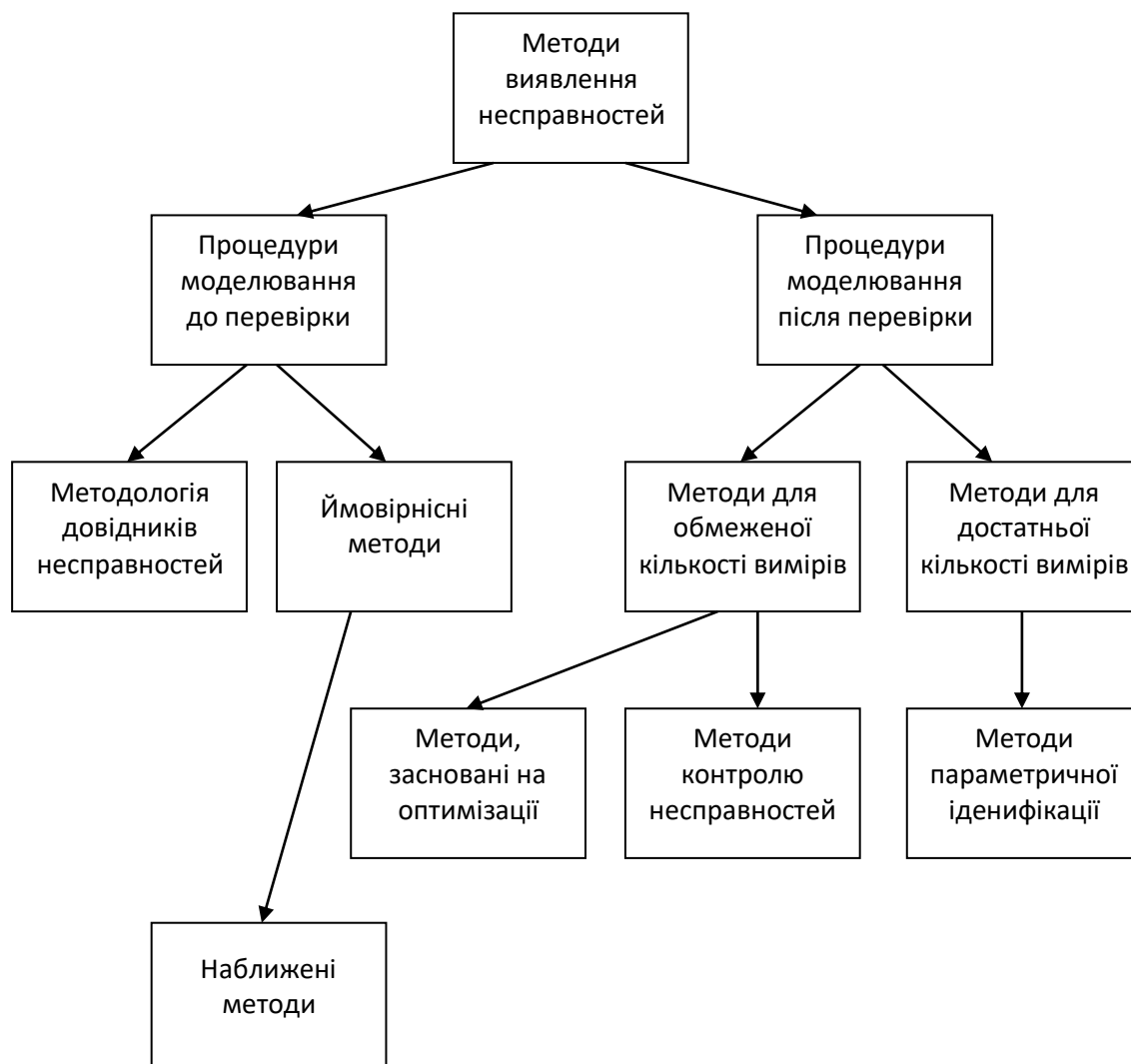


Рисунок 1.4 - Класифікація методів виявлення несправностей

У методах довідників несправностей зазвичай використовуються дуже прості критерії локалізації, наприклад, правило найближчого сусіда, а необхідні обчислення зводяться до виконання лише простих математичних операцій. Таким чином, вони задовольняють вимоги до оперативних обчислень.

Для дуже великої схеми розміри довідника може бути настільки великі, що для локалізації несправності потрібно обробити велику кількість елементів довідника, тобто перевірка може виявитися досить тривалою. У такому разі при

формуванні довідника та у процедурі локалізації доречно використовувати ідею декомпозиції. У практичному плані перевага мінімальності вимог до обсягу оперативних обчислень робить вибір методу довідників несправностей найбільш логічним. Проте наявність окремих недоліків змусила дослідників звернутися до пошуку більш ефективних підходів.

Нелінійні методи параметричної ідентифікації [16,17,18] дозволяють отримувати цікаві теоретичні результати, але пов'язані з необхідністю вирішувати нелінійні рівняння, а значить у складі пристроїв перевірки має бути складний обчислювальний пристрій. Крім того, час обчислень в загальному випадку виявляється більшим, ніж при використанні методу довідників несправностей. Зазвичай така особливість обмежує застосування методу для реалізації в контурі перевірки, коли важливо, щоб час перевірки був малий.

Лінійні методи зводяться до вирішення систем лінійних рівнянь, і тому вони висувають помірні вимоги до оперативних обчислень. Завдяки прогресу в галузі мікропроцесорної техніки автоматичне випробувальне обладнання неважко пристосувати до розв'язання систем лінійних рівнянь. У цьому плані лінійні методи параметричної ідентифікації добре відповідають практичним запитам. Але, на жаль, скорочення обсягу оперативних обчислень набувається ціною збільшення кількості тестових вузлів.

Щоб вирішити задачу мінімізації обсягу оперативних обчислень без організації доступу до всіх вузлів схеми, запропоновано методи контролю несправностей [19,20]. Для зменшення кількості можливих комбінацій, а отже, і часу проведення перевірки запропоновано комбінаторні, евристичні та декомпозиційні методи. В результаті для лінійних схем оперативне обчислення зводяться до операцій перемноження матриць та векторів.

Для нелінійних схем, однак, як і раніше, потрібно вирішувати нелінійні рівняння. Використовуючи можливості сучасних автоматичних випробувальних комплексів щодо паралельної обробки інформації, можна ще більше наблизитися до вирішення практичного завдання скорочення часу обчислень.

Для того, щоб виконати параметричну ідентифікацію в наближених методах використовується обмежена кількість вимірювань.

Метод апостеріорних ймовірностей [21] вимагає проведення чисельного інтегрування, яке цілком можливе на практиці і можна вважати, що потреба в оперативних обчисленнях виявляється дуже помірною. Найкращий за необхідною обчислювальною потужністю наближений метод - це метод $1/2$ - апроксимації, оскільки він вимагає виконувати тільки операції перемноження матриць і векторів. При його використанні виникає проблема, яка полягає в тому, що якість наближення, що отримується, вирішальним чином залежить від вибору вагових коефіцієнтів в критеріальній функції.

2) Вимоги до автономних обчислень.

Оскільки автономні обчислення виконуються до проведення фактичної перевірки, в оптимальному методі обсяг таких обчислень може бути помірним, тому що основне завдання полягає в максимально можливому скороченні обсягу оперативних обчислень.

З методом довідників несправностей пов'язана та складність, що через необхідність розгляду великої кількості можливих варіантів несправностей обсяг автономних обчислень може бути надмірним. Обсяг автономних обчислень скорочується трьома способами: - шляхом формування довідників з використанням методів декомпозиції схем; на основі ефективних процедур моделювання до перевірки (наприклад, за допомогою методу додаткових опорних елементів) та за допомогою таких моделей несправностей, які, будучи досить точними, не призводять до необхідності розв'язання некоректних завдань на стадії моделювання передперевірки.

У методах параметричної ідентифікації передперевіркове моделювання призначене зазвичай для визначення таких тестових сигналів та вибору таких контрольних точок вимірювань, які дозволяють досягти бажаного ступеня тестування. Зазвичай, такі дії вимагають менше витрат, ніж при оперативних розрахунках.

У методах контролю несправностей для отримання більшої частини інформації, необхідної в момент перевірки, використовуються номінальні значення параметрів схеми. Так, зокрема, розрахунок та запам'ятовування значень матриць, що описують функціонування лінійних схем, робляться до фактичного початку перевірки. Поступаючись за об'ємом попередніх обчислень у методі довідників несправностей, ці розрахунки тим не менш істотно знижують потребу в оперативних обчисленнях, а отже, дозволяють наблизитися до практичного оптимуму.

Реалізація наближених методів перевірки в реальному масштабі часу вимагає великого обсягу тестової інформації, яка збирається заздалегідь на основі моделей функціонування кола, що перевіряється в номінальному режимі або за наявності несправностей. Метод апостеріорних ймовірностей дуже близький до методів довідників несправностей, у яких розрахунки переважно робляться автономно та їх обсяг може бути досить великим. При використанні методу квадратичної оптимізації [22] та методів l_1 -апроксимації [23] значна частина інформації збирається автономно на основі номінальних значень параметрів. Проте, порівняно з оперативними обчисленнями обсяг автономних обчислень може вважатися мінімальним. У методі l_2 -апроксимації обернення матриць зазвичай проводиться автономно, що зводить потребу в оперативних розрахунках до операцій перемноження матриць і векторів. Тому вимоги до оперативної обробки при використанні методу l_2 -апроксимації можна вважати помірними.

3) Тестові вузли.

Зважаючи на те, що на практиці кількість вузлів, доступних вимірюванню та перевірці, зазвичай вкрай обмежена, кількість вибраних тестових вузлів слід по можливості мінімізувати. Деякі дослідники вважають, що верхньою його межею є метод l_2 -апроксимації \sqrt{N} , де N - число елементів у схемі [24].

У лінійних методах параметричної ідентифікації потрібна доступність всіх вузлів схеми, а в інших методах використовується обмежена кількість тестових вузлів. Тим не менш, зі збільшенням числа тестових вузлів зазвичай зростають достовірність та швидкість виявлення несправностей. У різних методах

використовують різну кількість тестових вузлів. Наприклад, у межах методу довідників несправностей зазвичай потрібно вкрай невелике їх число. У багатьох випадках довідник несправностей формується лише на основі вимірювання вхідних та вихідних сигналів схеми.

Для досягнення повної діагностовності всіх параметрів схеми за допомогою нелінійних методів ідентифікації потрібна більша порівняно з методом довідників несправностей кількість тестових вузлів.

При використанні методів контролю несправностей досягається компроміс між числом тестових вузлів, часом перевірки і ступенем діагностованості. Наприклад, у рамках методу декомпозиції схем, що спирається на вибір вкрай обмеженої кількості тестових вузлів, схема може бути розбита на невелику кількість великих підсхем, пов'язаних між собою цими тестовими вузлами. Виділення несправної підсхеми проводиться досить швидко, проте процес пошуку джерел несправності в межах несправної підсхеми виявляється відносно повільним. Аналогічні твердження справедливі щодо комбінаторних та евристичних методів.

Наближені методи пропонуються для того, щоб задовольнити обмеженням на кількість тестових вузлів, що виникають на практиці. Оскільки ці методи дають лише наближене рішення, розширення доступу до схеми збільшує їх діагностичні можливості.

4) Робастність.

Оптимальний підхід може бути робастним, тобто стійким щодо зміни параметрів справних елементів у діапазоні допустимих значень (у полі допусків). На відміну від цифрових в аналогових колах фактичні значення параметрів схеми завжди відхиляються від номінальних значень. Тому в будь-якій програмі перевірки аналогових схем має враховуватися наявність допусків.

У методах параметричної ідентифікації проблема стійкості вирішується у вигляді розрахунку значень всіх елементів схеми.

Однак специфічні особливості цих методів, що пов'язані з перевіркою, а саме велика кількість тестових вузлів та інтенсивність використання

оперативного режиму обчислень, можуть ускладнити їхнє застосування на практиці.

Головний недолік підходу, що використовує довідники несправностей, є в залежності ступеня діагностовності від допусків. Ступінь діагностовності можна зберегти шляхом розширення довідника, однак у загальному випадку такий шлях практично не придатний. Очевидно, що з розширенням поля допусків ступінь діагностовності знижується.

В основі методів контролю несправностей лежить припущення, що у всіх справних елементів значення параметрів будуть номінальними. Отже, тут також доводиться вирішувати питання про допуски.

Наявність розкиду ускладнює завдання виявлення несправностей так само, як присутність шуму ускладнює вирішення завдання відновлення вихідного сигналу. Як правило, бажано, щоб відношення сигнал/шум було високим. Аналогічно якість роботи багатьох алгоритмів виявлення несправності залежатиме від величини певного відношення несправність/допуск. У методі l_2 -апроксимації передбачається, що значення параметрів всіх елементів можуть відхилитися від номіналу, причому ці відхилення невеликі. При великих відхиленнях параметрів деяких елементів (несправностях) алгоритм працює вкрай ненадійно. На відміну від нього метод l_1 -апроксимації заснований на припущенні про те, що значення параметрів у невеликого числа елементів суттєво змінені. Збільшення відхилень параметрів інших елементів (внаслідок розкиду в межах допусків) позначиться на надійності способу. Метод апостеріорних ймовірностей спирається на ідею виділення вихідного сигналу із суміші сигналу та шуму, тому в межах розумних відхилень параметрів справних елементів цей метод працює добре.

5) Типи несправностей.

В ідеалі підхід повинен підходити для виявлення як поодиноких, так і множинних несправностей, причому вони можуть бути катастрофічними або поступовими.

Більшість методів довідників несправностей підходить для виявлення одиночних несправностей, зокрема катастрофічних несправностей та поступових несправностей з великим відхиленням параметрів.

Методи параметричної ідентифікації легко справляються з усіма типами несправностей, хоча деякі види катастрофічних несправностей можуть призводити до некоректних завдань та викликати погіршення збіжності чисельних рішень.

Методи контролю несправностей у загальному випадку дуже ефективні щодо виявлення одиночних несправностей. Застосування методу декомпозиції, евристичного та комбінаторного методів дозволяє практично виявляти численні несправності.

За винятком методу l_2 -апроксимації, передумова наближених методів полягає в припущенні про невелику кількість несправних елементів (наприклад у методі апостеріорних ймовірностей передбачаються поодинокі несправності).

6) Типи схем.

Основне завдання полягає в тому, щоб мати можливість працювати з будь-якими аналоговими колами і, перш за все, лінійними та нелінійними. Більшість методів використовують для перевірки лінійних або нелінійних схем.

Перевага методу довідників несправностей стосовно нелінійних схем полягає в тому, що обсяг оперативних розрахунків виявляється майже таким самим, як і в лінійному випадку. Для решти методів перехід від лінійних схем до нелінійних супроводжується збільшенням потреби в оперативних обчисленнях.

Слід зазначити, що деякі методи годяться лише для лінійних схем. Це наведено у таблиці 1.1, в якій перераховані характеристики кожного методу [25].

7) Моделі схем.

Ідеальний метод має бути пристосований до роботи як з номінальними моделями, так і з моделями несправностей.

Таблиця 1.1 - Порівняння різних методів виявлення несправностей

Характеристика методу	Обсяг оперативних розрахунків	Обсяг автономних розрахунків	Число тестових вузлів	Робастність	Типи несправностей	Типи схем	Моделі схем	Глибина діагностування	Можливість перевірки в робочому режимі
Довідників несправностей	Мінімальний	Великий	Обмеж.	Відсутня	Поодинокі	Лінійні/Нелінійні	В режимі несправнос.	Множина неоднозначності	Відсутня
Неліній. параметр. ідентифік.	Великий	Мінімальний	Обмеж.	Наявна	Численні	Лінійні/Нелінійні	В номін. режимі	Рівень елемента	Відсутня
Ліній. параметр. ідентифік.	Мінімальний	Помірний	Майже всі вузли	Наявна	Численні	В основному лінійні	В номін. режимі	Рівень елемента	Відсутня
Комбінаг. контролю несправностей	Помірний	Мінімальний	Обмеж	Наявна/відсутня	Численні	Лінійні/Нелінійні	В номін. режимі	Рівень елемента	Наявна
Меж відмов	Помірний	Великий	Обмеж	Наявна/відсутня	Численні	Лінійні/Нелінійні	В номін. режимі	Рівень елемента	Наявна
Декомпоз. схем	Помірний	Великий	Обмеж	Наявна	Численні	Лінійні/Нелінійні	В номін. режимі	Підсхема	Наявна
Апостеріорних ймовірностей	Помірний	Великий	Обмеж	Наявна/відсутня	Поодинокі	Лінійні	В номін. режимі	Рівень елемента	Наявна
I_2 -апроксимації	Мінімальний	Помірний	Обмеж	Відсутня	Численні	Лінійні/Нелінійні	В номін. режимі	Рівень елемента	Наявна
I_1 -апроксимації	Великий	Мінімальний	Обмеж	Наявна/відсутня	В основному поодинокі	Лінійні/Нелінійні	В номін. режимі	Рівень елемента	Наявна
Квадратичної оптимізації	Мінімальний	Помірний	Обмеж	Наявна	Численні	Лінійні/Нелінійні	В номін. режимі	Модуль/параметр	Наявна

Успіх застосування методу довідників несправностей залежить від вибору моделі несправності. Результативність всіх інших методів, що являють собою методи аналітичного типу, в основному визначається моделлю схеми, що використовується в номінальному режимі роботи, яка відома і достатня надійна.

Адекватність моделі несправності може виявитися суттєвою в процесі досягнення повної діагностованості на основі методів параметричної ідентифікації або при підвищеній швидкості роботи методів контролю несправностей. Наприклад, після того, як несправність локалізована з точністю до підсхеми, модель несправності можна застосувати для визначення джерела несправності самої підсхеми.

8) Глибина діагностики.

Більшість методів довідників несправностей досягають високого ступеня діагностовності, коли виявлення несправності зосереджено на рівні множин неоднозначності.

Методи параметричної ідентифікації та наближені методи, введені як методи виявлення параметрів, можна пристосувати для виділення модулів, що дозволить зменшити розмірність завдання ідентифікації та скоротити час перевірки.

Застосування методу декомпозиції схем має ту перевагу, що на початковому етапі, протягом якого відбувається виділення несправної підсхеми, метод працює як модульний. Згодом, коли проводиться ідентифікація несправних елементів у межах несправної підсхеми, він переорієнтовується на виявлення параметрів.

9) Можливість перевірки у робочому режимі.

Ідеальний алгоритм повинен дозволяти проводити перевірку в робочому режимі.

У загальному випадку методи довідників несправностей та методи параметричної ідентифікації вимагають застосування спеціальних наборів вхідних тестових сигналів, так що в цьому сенсі вони непридатні для перевірки в робочому режимі.

Методи контролю несправностей та наближені методи спираються на обмежену кількість вимірювань, які можна отримати з використанням звичайних вхідних сигналів кола, що перевіряється. Таким чином, ці методи краще пристосовані для проведення перевірок у робочому режимі.

У таблиці 1.1 зібрано практичні завдання різних алгоритмів та зазначено, наскільки повно ці завдання вдається вирішити під час використання кожного з методів.

Одночасно із оглядом є ціла серія теоретичних робіт. Наприклад, інформаційний метод, який вимагає подання схеми пристрою у вигляді структури з одним виходом та двома можливими станами "справно", "несправно" [26]. Процедура та алгоритм діагностування будуються на основі інформаційного критерію. Інший метод, заснований на застосуванні функціональних рядів Вольтерра-Винера [27], може бути практично застосований тільки для аналізу малих спотворень, коли гармоніка вище третьої відкидається. Такий підхід ефективний при реалізації високопродуктивних комп'ютерів і точний для слабких нелінійностей при малому сигналі. Аналогічні недоліки мають методи, засновані на подачі на вхід схеми одиничної ступінчастої або імпульсної функції та аналізі розкладання функції реакції схеми в ряди Фур'є, Бесселя та ін.

Таким чином, найбільш достовірним способом оцінки якості та надійності системи є на сьогодні імітаційне комп'ютерне моделювання на основі ідентифікаційного підходу.

1.3 Постановка завдання дипломної роботи

Розглянемо з погляду системного підходу досліджувану систему. Узагальнене зображення системи наведено на рисунку 1.5.

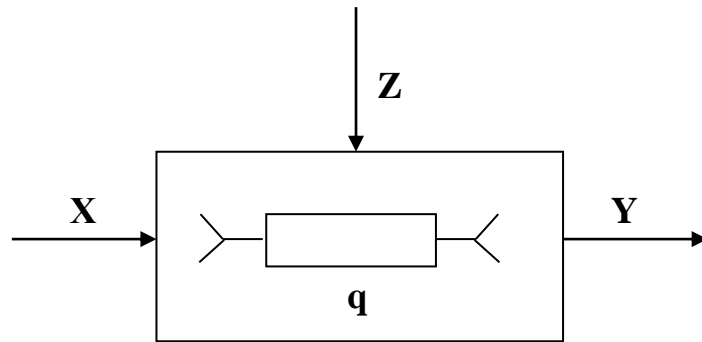


Рисунок 1.5 - Узагальнене зображення системи

Її внутрішніми параметрами є параметри її комплектуючих елементів, пов'язаних між собою згідно з принциповою схемою. На систему діють вектор вхідних впливів X - це може бути електричні вхідні впливи, тобто струми та напруги живлення і сигналу. Крім цих "корисних" вхідних впливів на систему діють і "шкідливі" зовнішні фактори Z - це можуть бути температура навколишнього середовища, інші кліматичні фактори, вплив сусідніх об'єктів, різні виробничі впливи, а також часовий фактор, що мають місце під час експлуатації. У нашому випадку перевірка справності системи спочатку проводиться за нормальних кліматичних умов на етапі її виготовлення, тому як зовнішні фактори в даному випадку виступають різні виробничі фактори, що мають місце при виробництві системи, описані в підрозділі 1.1. Робота системи характеризується її вихідними характеристиками Y , тобто її реакціями на вхідні дії та зовнішні фактори. Наприклад, для радіоелектронної системи це можуть бути амплітудно-частотна характеристика, вихідні струми, напруги, потужності тощо. Під дією зовнішніх факторів змінюються значення внутрішніх параметрів q , що у свою чергу призводить до зміни вихідних характеристик Y . Під дією зовнішніх факторів також можуть змінитися і зв'язки між елементами, наприклад, при відмові елемента змінюється топологія схеми, проте подібні дефекти в даній роботі не розглядаються.

Таким чином, з математичної точки зору завдання діагностування можна поставити наступним чином.

Необхідно, вимірявши вихідні характеристики системи в доступних вузлах схеми, визначити дійсні значення параметрів і режимів роботи комплектуючих елементів і, порівнявши їх з гранично-допустимими значеннями, класифікувати технічний стан системи як справний або несправний (рис.1.6).

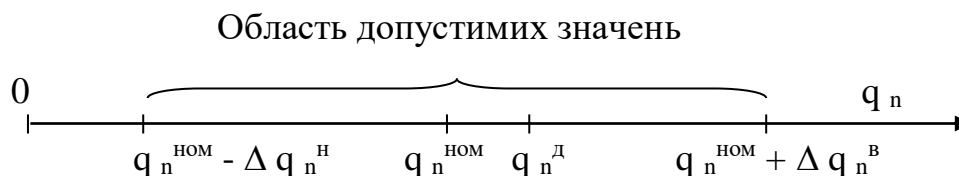


Рисунок 1.6 - Область можливих значень параметра q_n

q_n^{НОМ} - номінальне значення n-го внутрішнього параметра;

Δq_n^Н, Δq_n^В - нижній та верхній допуски на n-й внутрішній параметр;

q_n^Д - дійсне значення n-го внутрішнього параметра.

У цьому система класифікується як несправна, якщо дійсне значення хоча б одного її внутрішнього параметра виходить за допустимі межі, тобто якщо не виконується умова:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1^{\text{НОМ}} - \Delta q_n^{\text{Н}} \leq q_1^{\text{НОМ}} \leq q_1^{\text{НОМ}} + \Delta q_n^{\text{В}} \\ q_2^{\text{НОМ}} - \Delta q_n^{\text{Н}} \leq q_2^{\text{НОМ}} \leq q_2^{\text{НОМ}} + \Delta q_n^{\text{В}} \\ \dots \\ q_n^{\text{НОМ}} - \Delta q_n^{\text{Н}} \leq q_n^{\text{НОМ}} \leq q_n^{\text{НОМ}} + \Delta q_n^{\text{В}} \end{array} \right. \quad (1.1)$$

Крім того, поруч із значеннями параметрів елементів необхідно контролювати ще їх режими роботи тому, що навіть при допустимих значеннях параметрів елементів у процесі експлуатації системи можуть бути порушені режими роботи елементів через можливі помилки, допущені при проектуванні системи. Тому після перевірки виконання умови (1.1) необхідна перевірка виконання умови (1.2):

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1^d \leq R_1^{\text{доп}} \\ R_2^d \leq R_2^{\text{доп}} \\ \dots\dots\dots \\ R_k^d \leq R_k^{\text{доп}} \end{array} \right. , \quad (1.2)$$

де $R_1^d, R_2^d \dots R_k^d$ - дійсні значення 1,2,..., k-го режимів роботи елемента;
 $R_1^{\text{доп}}, R_2^{\text{доп}} \dots R_k^{\text{доп}}$ - гранично-допустимі значення 1,2,..., k -го режимів роботи елемента.

При виконанні умов (1.1) та (1.2) робиться висновок про відсутність даного виду дефектів у системі, що діагностується.

Враховуючи викладене, метою дипломної роботи є підвищення надійності технічних систем шляхом виявлення дефектів у вигляді виходу дійсних значень параметрів, комплектуючих елементів за допуски та порушення їх режимів роботи.

Для досягнення поставленої мети у дипломній роботі необхідно вирішити такі завдання:

1) Розробити метод діагностування елементів на етапі виробництва та експлуатації технічної системи.

Для цього необхідно:

- розробити діагностичну модель для контролю параметрів та режимів роботи елементів, що комплектують систему;
- розробити алгоритм забезпечення діагностовності системи на етапі її проектування;
- розробити алгоритм діагностування елементів на етапі виробництва та експлуатації системи.

2) Розробити комп'ютерну систему діагностування елементів на етапі виробництва та експлуатації системи.

Для цього необхідно:

- визначити склад та розробити алгоритм функціонування комп'ютерної системи діагностування;
- розробити структуру вхідних та вихідних даних;
- розробити програмну та інформаційну комп'ютерну систему;
- провести тестування комп'ютерної системи.

3. Експериментально перевірити результати роботи.

Для цього необхідно:

- провести експериментальне дослідження дослідних зразків системи з метою перевірки та підтвердження практичної застосовності розроблених методу, моделі, алгоритмів та програмних засобів діагностування елементів у системі на етапі виробництва та експлуатації.

1.4 Висновки за розділом 1

1) Показано, що на етапі виробництва та експлуатації технічних систем завдання виявлення дефектів у вигляді виходу дійсних значень параметрів комплектуючих елементів та їх режимів роботи за допустимі межі є актуальним і має вирішуватись запровадженням етапу автоматизованого діагностування параметрів та режимів роботи елементів.

2) Показано, що розв'язання задачі діагностування елементів у технічних системах з метою виявлення дефектів у вигляді виходу їх дійсних значень за допустимі межі доцільно здійснювати шляхом поєднання методу інструментальних вимірювань вихідних характеристик у доступних вузлах схеми та комп'ютерних методів розрахунку значень параметрів елементів та їх режимів роботи.

3) Проаналізовано існуючі методи діагностування елементів у технічних системах та оцінки їх режимів роботи, та показано їх непридатність для

комплексної оцінки параметрів усіх елементів, що комплектують систему та їх режимів роботи.

4) Сформульовано мету та поставлено завдання дипломної роботи.

2 РОЗРОБКА МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ВНУТРІШНІХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

У цьому розділі викладено метод діагностування внутрішніх параметрів технічних систем, основою якого є принципи системного підходу, топологічного моделювання, теорії параметричної чутливості та оптимізації.

Як технічні системи для конкретики розглядаються електронні системи, хоча аналізований метод може бути застосований для будь-якої технічної системи за умови наявності її адекватної математичної моделі тому, що точність моделі кардинально впливає на точність діагностування. В даному випадку, як внутрішні параметри подібного класу систем розглядаються електричні параметри комплектуючих елементів системи та параметри їх математичних моделей.

Сутність розробленого методу полягає в отриманні дійсних значень внутрішніх параметрів та режимів роботи елементів, що комплектують систему, та порівнянні їх з допустимими.

Дійсні значення параметрів та режимів роботи елементів отримуються розрахунковим шляхом на основі експериментально отриманих вихідних характеристик системи із застосуванням методу оптимізації.

При цьому несправність елемента або порушення режиму його роботи класифікується за ознакою потрапляння або не потрапляння значень його параметра або режиму роботи в межі, встановлені межами зон допусків на них.

Для реалізації такого підходу в розділі представлена розроблена діагностична модель системи [28-31], що включає цільову функцію, елементи

якої вибираються на етапі проектування системи з урахуванням забезпечення її діагностовності, а їх значення отримуються в результаті вимірювання вихідних характеристик системи, що діагностується, і в результаті рішення системи рівнянь, що є її математичною моделлю. Розроблена модель дозволяє звести завдання діагностування до мінімізації цільової функції.

Розроблено [32,33] алгоритм аналізу та забезпечення діагностовності системи на етапі її проектування.

Для дослідження запропонованої моделі розроблено алгоритм діагностування елементів системи на етапі її виробництва та експлуатації [34,35].

2.1 Вимоги до методу діагностування внутрішніх параметрів технічних систем

Вимоги до методу діагностування параметрів елементів технічної системи впливають із особливостей функціонування елементів у складі системи, сутності діагностування елементів, необхідності зниження трудомісткості та підвищення точності діагностування.

Виходячи з цього основні вимоги до методу діагностування параметрів елементів технічної системи можна сформулювати наступним чином.

Використання розробленого методу як математичного забезпечення автоматизованого діагностування елементів в технічній системі повинно дозволяти:

- забезпечувати діагностовність системи на стадії її проектування;
- призначати інформативні контрольні точки вимірювання вихідних характеристик та вибирати ефективні тестові входні впливи для перевірки справності системи;
- визначати дійсні значення параметрів елементів, що комплектують систему та режими їх роботи;

- порівнювати дійсні значення параметрів та режимів роботи елементів системи з гранично-допустимими та видавати інформацію про ступінь їх відповідності;

- підвищувати надійність та якість технічних систем шляхом виявлення дефектів у вигляді відходу дійсних значень параметрів елементів, що комплектують систему, за допуски та порушення їх режимів роботи.

Крім того, метод повинен бути орієнтований на максимальне використання інформації, отриманої від системи автоматизованого проектування та дозволяти автоматизувати процес діагностування технічних систем під час їх виробництва та експлуатації..

2.2 Метод діагностування внутрішніх параметрів технічних систем

Метод діагностування найефективніше буде застосований при спільному використанні з САПР, що використовується при проектуванні конкретної технічної системи і забезпечує високу точність моделювання її процесів і характеристик.

На сьогоднішній день у практиці проектування практично будь-яких технічних систем широко використовуються потужні САПР, які дозволяють проектувати системи практично будь-якої складності. Вони дозволяють моделювати широкий клас систем у статичному та динамічному режимах, частотній та часовій областях, дозволяють розраховувати функції чутливості вихідних характеристик до змін внутрішніх параметрів, а деякі з них проводити оптимізацію вихідних характеристик.

Математичне забезпечення цих САПР включає методи інтегрування систем інтегро-диференційованих рівнянь зі змінним кроком і порядком, методи вирішення систем нелінійних алгебраїчних рівнянь, методи вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь, які враховують розрідженість математичної

моделі схеми. Наприклад, математична модель електричної схеми будується на основі однорідного скороченого координатного базису (метод вузлових потенціалів), або розширеного координатного базису. Програми використовують проблемно-орієнтовані мови високого рівня для опису схем, бібліотеки моделей, які включають моделі найрізноманітніших комплектуючих системи елементів. Програмна реалізація цих САПР орієнтована на комп'ютери різних платформ, що функціонують в середовище Windows та UNIX.

Таким чином, було б доцільно використати всю потужність цих систем і, доповнивши їх кількома програмними модулями, суттєво розширити їх можливості та зробити інструментом не лише розробників апаратури, а й групи супроводу та обслуговування.

Метод діагностування технічного стану систем за допомогою існуючих САПР та, природно, контрольної-вимірювальної апаратури представлений на рисунку 2.1 [36,37]. Метод охоплює і етап проектування, який включає забезпечення діагностовності системи до рівня параметра елемента, що дозволяє здійснювати автоматизований аналіз вихідних характеристик, параметрів елементів та їх режимів роботи для подальшого визначення технічного стану рівня комплектуючого елемента як на стадії виробництва, так і на стадії експлуатації системи.

На етапі проектування вирішується завдання забезпечення діагностування системи. Для цього за розробленою схемою та конструкцією системи (блок 1) розраховуються її вихідні характеристики (блок 2) з метою вибору ефективних вхідних впливів та вихідних характеристик, достатніх для однозначного визначення значень усіх діагностованих параметрів елементів (блок 3).

Для виробника та споживача, які безпосередньо перевіряють виготовлену та експлуатовану апаратуру, на етапі проектування складаються інструкції, до яких заносяться вхідні сигнали, точки вимірювання вихідних характеристик, методика визначення експлуатаційних відбракувальних допусків, а також послідовність дій.

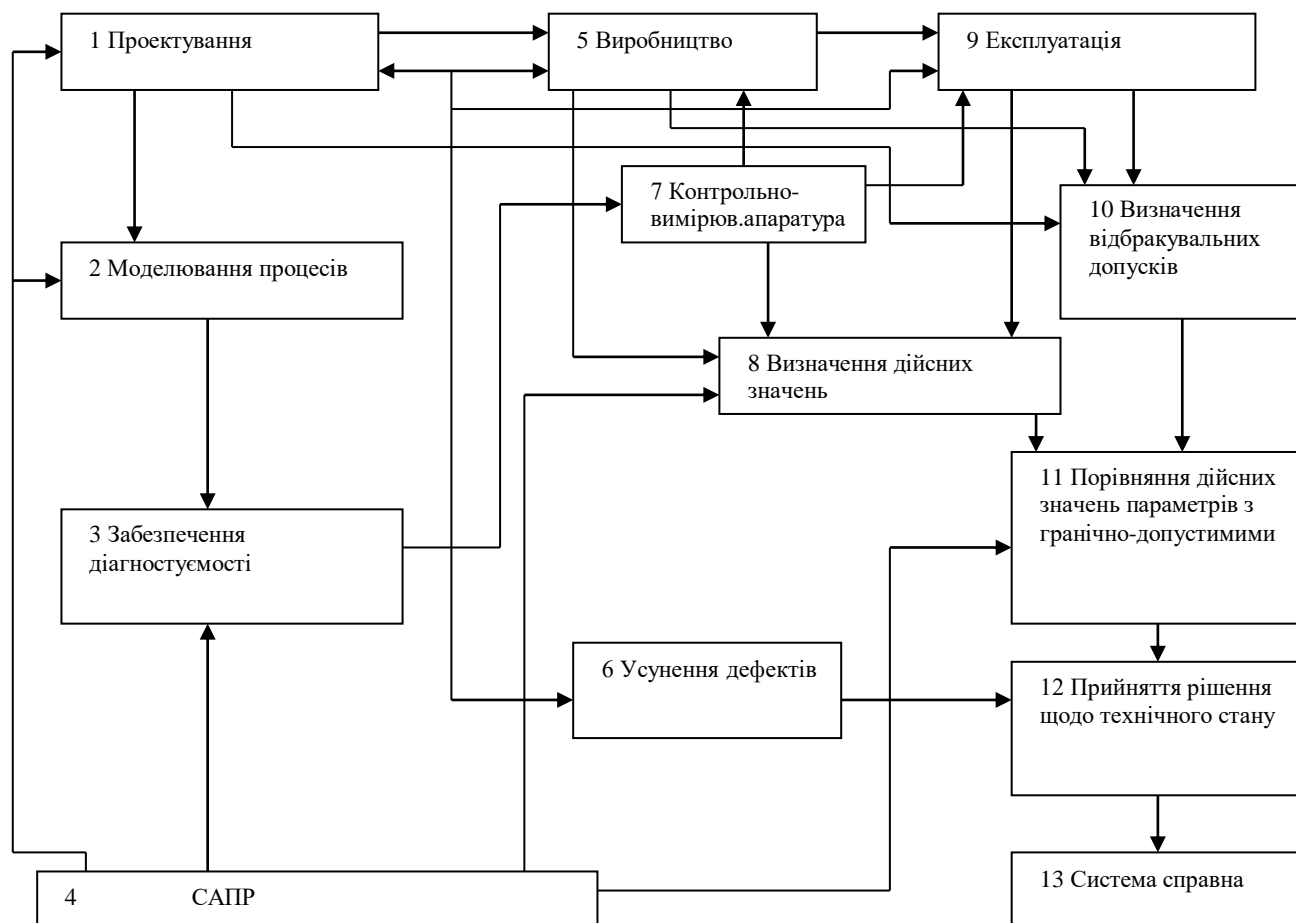


Рисунок 2.1 - Блок-схема метода автоматизованого діагностування

При діагностуванні системи на етапі виробництва (блок 5) та етапі експлуатації (блок 9) за допомогою контрольно-вимірвальної апаратури задаються входні сигнали та вимірюються вихідні характеристики (блок 7). Гранично-допустимі значення параметрів елементів на етапі виробництва визначаються через номінальні значення параметрів елементів та технологічні допуски. Гранично-допустимі значення параметрів елементів на етапі експлуатації залежить від температури елементів, часу експлуатації і розраховуються через отбраковочные допуски (блок 10). Потім результати вимірювань разом із гранично-допустимими значеннями параметрів елементів вводяться в комп'ютер, де за закладеною програмою визначаються дійсні значення параметрів елементів (блок 8).

Отримані дійсні значення параметрів елементів порівнюються з допустимими (блок 11) і видається рішення про наявність або відсутність дефекту (блок 12).

Якщо дефект є (блок 6), то видається інформація про те, параметр якого елемента вийшов за допуск та рекомендації щодо його заміни чи регулювання. Якщо всі елементи системи не мають дефектів і перебувають у допустимих межах, її технічний стан визначається як справний (блок 13).

Для взаємодії системи діагностування з САПР бажано мати вихідний програмний код САПР, інакше з'являється необхідність у додаткових інтерфейсних модулях між сторонньою САПР та системою діагностування.

2.3 Діагностична математична модель

Описаний метод розроблений на основі спеціальної діагностичної моделі технічної системи, яка включає математичну модель цієї ж системи, що використовується при її проектуванні.

Наприклад, діагностична модель радіоелектронної системи включає її математичну модель, що розглядається в базисі вузлових потенціалів.:

$$\mathbf{I}_m(\boldsymbol{\varphi}_m) = 0, \quad (2.1)$$

де \mathbf{I}_m - вектор вузлових струмів, розмірності m ; $\boldsymbol{\varphi}_m$ - вектор вузлових потенціалів розмірності m ; m - кількість вузлів у схемі.

Математична модель має забезпечувати діагностованість системи, тобто дозволяти визначати значення її внутрішніх параметрів (параметрів елементів) за відомими (вимірними) вихідними характеристиками системи.

Насправді є доступ лише до обмеженого числа вузлів системи, куди можна подавати тестові впливи і знімати вихідні характеристики. Крім того, кількість внутрішніх параметрів системи набагато більша за кількість доступних вузлів. Тому для визначення значення параметрів елементів за заданими (вимірними) вихідними характеристиками пропонується застосувати метод оптимізації. У процесі оптимізації оптимізуються значення внутрішніх параметрів системи \mathbf{q} так, щоб максимально наблизити розрахункові значення вихідних характеристик системи до вимірних.

Як критерій відповідності розрахункових значень вихідних характеристик вимірним значенням використовується критерій мінімуму середньоквадратичної помилки [31,39]:

$$f(\mathbf{q}) = \sum_{j=1}^M \left(Y_{j\text{розр}}(\mathbf{q}) - Y_{j\text{вим}}(\mathbf{q}) \right)^2, \quad (2.2)$$

де $Y_{j\text{розр}}(\mathbf{q})$, $Y_{j\text{вим}}(\mathbf{q})$ - відповідно розрахункове та вимірне значення j -ї вихідної характеристики; M – число вимірюваних вихідних характеристик.

Тому, що в якості вимірюваної вихідної характеристики системи можуть виступати величини різної розмірності (наприклад, струм, напруга, температура і т.д.), то у формулі (2.2) доцільно перейти від абсолютних величин до відносних:

$$f(\mathbf{q}) = \sum_{j=1}^M \left(\frac{Y_{j\text{розр}}(\mathbf{q}) - Y_{j\text{вим}}(\mathbf{q})}{Y_{j\text{вим}}(\mathbf{q})} \right)^2 = \sum_{j=1}^M \left(\frac{Y_{j\text{розр}}(\mathbf{q})}{Y_{j\text{вим}}(\mathbf{q})} - 1 \right)^2, \quad (2.3)$$

де $Y_{j\text{розр}}(\mathbf{q})$, $Y_{j\text{вим}}(\mathbf{q})$ - відповідно розрахункове та вимірне значення j -ї вихідної характеристики; M – число вимірюваних вихідних характеристик.

У формулі (2.3) під позначенням Y мається на увазі характеристика як залежність функції від аргументу (частоти, часу тощо) і кожному значенню аргументу відповідає значення функції, тобто будь-яку експериментально

вимірну характеристику можна подати певним числом дискретів чи відліків (вимірів). Тому перетворимо формулу (2.3) наступним чином:

$$f(\mathbf{q}) = \sum_{j=1}^M \sum_{r=1}^{P_j} \left(\frac{Y_{jg \text{ розр}}(\mathbf{q})}{Y_{jg \text{ вим}}(\mathbf{q})} - 1 \right)^2 \Rightarrow \min, \quad (2.4)$$

де $Y_{jg \text{ розр}}(\mathbf{q})$, $Y_{jg \text{ вим}}(\mathbf{q})$ - відповідно розрахункове та вимірне значення g -го відліку j -ї вихідної характеристики; M - число вихідних характеристик; P_j - число відліків j -ї вихідної характеристики.

Якщо продовжувати розглядати як приклад технічної системи радіоелектронну систему, то розрахункові значення вихідних характеристик $Y_{jg \text{ розр}}(\mathbf{q})$, що входять у цільову функцію обчислюються через потенціали у вузлах схеми

$$Y_{jg \text{ розр}} = Y_{jg \text{ розр}}(\Phi), \quad (2.5)$$

залежно від виду вихідної характеристики (наприклад, струм, напруга, коефіцієнт передачі та ін.).

Потенціали у вузлах схеми Φ розраховуються за допомогою методу Ньютона-Рафсона та методу LU розкладання, що вимагає менших обчислювальних витрат у порівнянні з методом Гаусса при багаторазових розрахунках, що є особливо ефективним при оптимізації. Розрахунок вузлових потенціалів у часовій області проводиться за допомогою методу, циклічного застосування явної та неявної формул Ейлера, основними перевагами якого є абсолютна стійкість, другий порядок точності, надійність оцінки похибки апроксимації на кожному кроці інтегрування, малий обсяг оперативної пам'яті, простота програмної реалізації.

Для мінімізації функції середньоквадратичної помилки використовується метод оптимізації. Методи, які застосовуються зараз для вирішення задач оптимізації, є досить численними. Серед них відсутній універсальний метод, який був би найкращим в усіх чи в більшості випадків. Вибір методу, пов'язаного з особливостями конкретного завдання, підвищує ймовірність його успішного вирішення з мінімальними витратами [38]. В основі діагностичної моделі лежить опуклий функціонал, який є композицією опуклих функцій. Для таких функцій найкращими за швидкістю збіжності та стійкості є градієнтні методи другого порядку, наприклад, метод Ньютона. Однак цей метод вимагає обчислення матриці Гессе других часткових похідних та її звернення [38].

Найбільш доцільно використовувати метод Давидона-Флетчера-Пауелла, який не вимагає на кожному кроці обчислення зворотного гессиана $\mathbf{G}^{-1}(\mathbf{q}_i)$ тому, що напрямок пошуку на кроці i є напрямком $-\mathbf{H}_i \mathbf{g}(\mathbf{q}_i)$, де \mathbf{H}_i - позитивно визначена симетрична матриця, яка оновлюється на кожному кроці. У ліміті матриця \mathbf{H} стає рівною зворотному гесіану. Цей метод використовує як ідеї методу Ньютона, так і властивість сполучених градієнтів, і при використанні мінімізації опуклих квадратичних функцій сходиться досить швидко.

Тому значення внутрішніх параметрів, що діагностуються, розраховуються методом Давидона-Флетчера-Пауелла (ДФП), який як і метод Ньютона заснований на формулі

$$\mathbf{q}_{i+1} = \mathbf{q}_i - \lambda_i \cdot \mathbf{G}^{-1}(\mathbf{q}_i) \cdot \mathbf{g}(\mathbf{q}_i), \quad (2.6)$$

де \mathbf{q} - вектор параметрів, що діагностуються, i - номер ітерації оптимізації, λ - параметр шага оптимізації, \mathbf{g} - градієнт цільової функції, \mathbf{G} - матриця функцій чутливості другого порядку (так звана матриця Гесса), і має квадратичну швидкість збіжності, проте не вимагає розрахунку і звернення на кожній ітерації матриці Гесса і сходиться для будь-якого початкового наближення.

Пошук мінімуму цільової функції (2.4) починається з початкової точки \mathbf{q}_0 (зазвичай номінальні значення параметрів, що діагностуються), при цьому за початкову приймається одинична матриця \mathbf{H}_0 .

Метод Давидона-Флетчера-Пауелла є градієнтним методом оптимізації та крім значення цільової функції (2.4) вимагає розрахунку її градієнта. Градієнт є вектором і виражається через функції чутливості цільової функції до зміни значень параметрів.

Елементи вектора градієнта цільової функції (2.4) визначаються за формулою

$$\mathbf{A}_{\mathbf{q}_n}^f(\mathbf{q}) = \frac{\mathcal{F}}{\partial \mathbf{q}_n} = 2 \sum_{j=1}^M \sum_{r=1}^{P_j} \left(\frac{Y_{jr \text{ розр}}(\mathbf{q})}{Y_{jr \text{ вим}}(\mathbf{q})} - 1 \right) \cdot \frac{\partial Y_{jr \text{ розр}}(\mathbf{q}) / \partial \mathbf{q}_n}{Y_{jr \text{ вим}}(\mathbf{q})}, \quad (2.7)$$

де $\frac{\partial Y_{jr \text{ розр}}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}_n} = \mathbf{A}_{\mathbf{q}_n}^Y$ - функції чутливості вихідних характеристик за

параметрами, що розраховуються у відповідній схемотехнічній САПР методом прирощень.

Якщо на етапі забезпечення діагностовності системи не вдається підібрати вихідні характеристики, які забезпечували б однокстремальність цільової функції (2.4) в області всіх можливих значень параметрів, що діагностуються \mathbf{q} від мінус нескінченності до плюс нескінченності, то на значення діагностованих параметрів необхідно накладати обмеження $q_n^{\text{обм}_н}$ та $q_n^{\text{обм}_в}$, що обмежують область можливих значень параметрів, що діагностуються.

Для того, щоб розраховані за допомогою описаного вище методу безумовної оптимізації значення параметрів, що діагностуються, задовольняли накладеним обмеженням був застосований метод перетворених параметрів [39].

Перетворені параметри, що варіюються \mathbf{q}' пов'язані з вихідними \mathbf{q} таким чином, що за будь-якого значення $q_n' \in [-\infty, \infty]$ значення q_n не виходять за задані

обмеження. Якщо на параметр q_n накладено обмеження $q_n^{\text{огр}_H} < q_n < q_n^{\text{огр}_B}$, то q_n замінюється на

$$q_n = q_n^{\text{обм}_H} + (q_n^{\text{обм}_B} - q_n^{\text{обм}_H}) \cdot \text{Sin}^2(q_n'). \quad (2.8)$$

Це дозволяє проводити безумовну оптимізацію у просторі параметрів \mathbf{q}' , не порушуючи обмежень на \mathbf{q} .

З урахуванням обмежень (2.8) елементи градієнта цільової функції (2.4) обчислюються згідно з формулою

$$\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial q_n'} = 2 \sum_{j=1}^M \sum_{r=1}^{P_j} \left(\frac{Y_{j,r,\text{розр}}(\mathbf{q})}{Y_{j,r,\text{вим}}(\mathbf{q})} - 1 \right) \cdot \frac{\partial Y_{j,r,\text{розр}}(\mathbf{q}) / \partial q_n}{Y_{j,r,\text{вим}}(\mathbf{q})} \cdot \frac{\partial q_n}{\partial q_n'}, \quad (2.9)$$

де похідна від функції обмеження має такий вигляд

$$\partial q_n / \partial q_n' = 2 \cdot (q_n^{\text{обм}_B} - q_n^{\text{обм}_H}) \cdot \text{Cos}(q_n') \cdot \text{Sin}(q_n'). \quad (2.10)$$

Таким чином, діагностична математична модель на прикладі радіоелектронної системи включає аналітичну модель електричної схеми системи в базисі вузлових потенціалів (2.1), цільову функцію оптимізації (2.4) і рівняння, що зв'язують вихідні характеристики, що входять в цільову функцію, і потенціали у вузлах схеми (2.5). Для іншого класу технічних систем змінюється лише компонент, що описує модель функціонування цього класу систем.

Для класифікації технічного стану системи необхідно порівняти отримані розрахунковим шляхом із результатів вимірів дійсні значення параметрів елементів \mathbf{q}_d з їх гранично-допустимими значеннями \mathbf{q}_H та \mathbf{q}_B . При цьому система характеризується як несправна, якщо дійсне значення електричного параметра хоча б одного елемента вийшло за допустимі межі.

Крім того, за розрахованими дійсними значеннями електричних параметрів елементів \mathbf{q}_d та відомими значеннями вхідних впливів \mathbf{X} розраховуються електричні режими роботи елементів \mathbf{R}_d .

Отримані в результаті розрахунку дійсні значення електричних режимів роботи елементів \mathbf{R}_d також порівнюються із гранично-допустимими значеннями $\mathbf{R}_{\text{доп}}$, і за порушення електричного режиму роботи хоча б одного елемента система класифікується як несправна.

2.4 Розробка алгоритму забезпечення діагностовності технічної системи на стадії її проектування

Забезпечення діагностовності є проектним завданням, яке має вирішуватися починаючи з ранніх етапів технічного проектування [40]. Інакше знижується ефективність діагностування та підвищуються витрати, пов'язані з можливими доопрацюваннями схеми та конструкції.

Діагностовність системи вважатимемо забезпеченою у разі, коли вдається однозначно визначати значення всіх діагностованих внутрішніх параметрів, тобто з математичної точки зору, коли цільова функція 2.4 має один мінімум в області, обмеженій заданими обмеженнями на можливі значення параметрів, що діагностуються. Тому, що з математичної точки зору доказ односторонності цільової функції викликає складнощі, то в даному випадку йдеться про перевірку односторонності цільової функції в досліджуваній області. Тобто, якщо починаючи процес оптимізації з різних початкових точок вдається щоразу потрапити в один і той самий мінімум цільової функції, вважатимемо, що в досліджуваній області вона має один мінімум.

Цю умову можна забезпечити шляхом вибору ефективних вхідних тестових впливів та інформативних вихідних характеристик системи ще на стадії її технічного проектування із застосуванням відповідної САПР (у прикладі з

радіоелектронною системою - що дозволяють отримати вектори вузлових потенціалів та матриці функцій параметричної чутливості) та програми оптимізації параметрів.

Наведені вище обґрунтування та вибір критерію дозволили розробити алгоритм забезпечення діагностовності технічної системи на стадії її автоматизованого проектування [32]. Блок-схема алгоритму наведена на рисунку 2.2.

Дамо короткий опис змісту блоків алгоритму.

Початок алгоритму забезпечення діагностовності.

Блок 1. За допомогою програми автоматизованого проектування здійснюється моделювання схем роботи системи. При цьому використовуються стандартні моделі елементів, закладені у програму. Розраховуються вихідні характеристики системи, що наведені в ТУ на неї, при номінальних значеннях всіх внутрішніх параметрів та відносні функції параметричної чутливості цих характеристик до зміни значень параметрів S^{Y_q} .

Блок 2. За розрахованими у блоці 1 значеннями функцій параметричної чутливості S^{Y_q} з усіх внутрішніх параметрів системи вибираються значущі параметри. До числа параметрів, що відбираються, обов'язково повинні входити параметри елементів, у яких значення функції параметричної чутливості не зневажливо малі. Надалі ці параметри діагностуються, а значення інших внутрішніх параметрів системи приймаються постійними і рівними номінальним.

Блок 3. Вибираються вхідні тестові впливи X і вихідні характеристики системи Y , що дозволяють на наступному етапі однозначно визначати значення всіх параметрів, що діагностуються.

Блок 4. За допомогою програми автоматизованого проектування проводиться розрахунок вихідних характеристик системи $Y_{ном}$, вибраних у блоці 4 при номінальних значеннях всіх внутрішніх параметрів системи $q_{ном}$.

Блок 5. Розраховані в блоці 4 вихідні характеристики системи $Y_{ном}$, задаються в програмі розрахунку дійсних значень параметрів, що діагностуються,

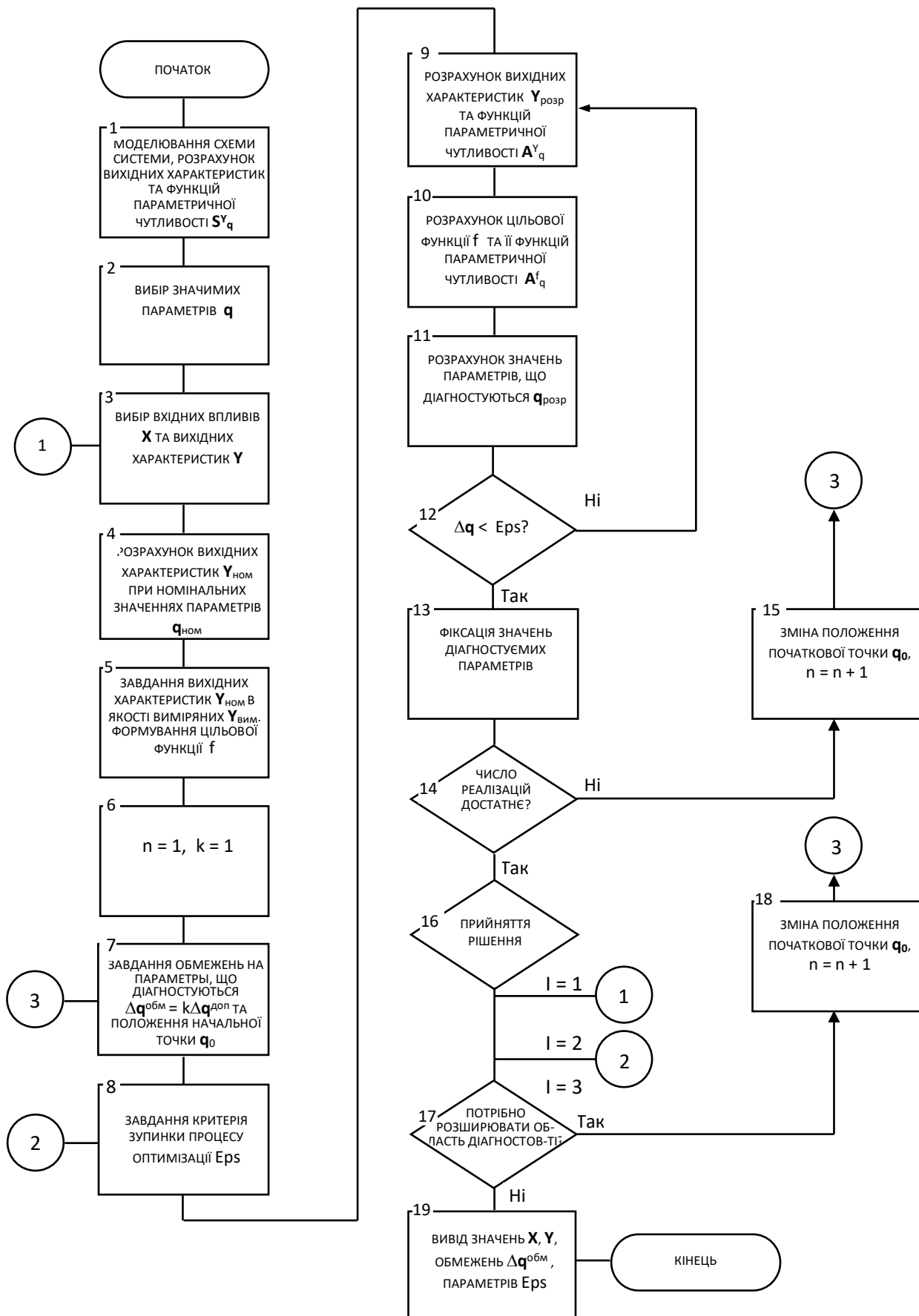


Рисунок 2.2 - Алгоритм забезпечення діагностовності технічної системи на стадії її проектування

в якості вимірних $Y_{\text{вим}}$. За вибраними вихідними характеристиками системи та їх вимірними значеннями $Y_{\text{вим}}$ формується цільова функція f (2.4).

Блок 6. Змінним n та k присвоюються одиничні значення.

Блок 7. Задаються обмеження $\Delta q^{\text{обм}}$ на параметри, що діагностуються q відповідно до формули $\Delta q^{\text{обм}} = k \cdot \Delta q^{\text{доп}}$, де $\Delta q^{\text{доп}}$ - допуски на параметри, що діагностуються. При цьому, залежно від заданих обмежень, автоматично призначаються початкові значення оптимізованих параметрів q_0 .

Блок 8. Задається значення критерію зупинки процесу оптимізації E_{ps} .

Блок 9. Розраховуються вихідні характеристики системи $Y_{\text{розр}}$ та абсолютні функції параметричної чутливості вихідних характеристик до зміни значень параметрів A^Y_q . При цьому значення вхідних впливів X обрані в блоці 4, а значення параметрів, що діагностуються $q^i_{\text{розр}}$ обчислюються на кожній ітерації процесу оптимізації.

Блок 10. За заданими значеннями вихідних характеристик $Y_{\text{вим}}$ та їх розрахованим значенням $Y_{\text{розр}}$ за формулою (2.4) розраховується значення цільової функції f , та за розрахованим значенням A^Y_q розраховуються функції параметричної чутливості цільової функції (градієнт цільової функції) A^f_q за формулою (2.7).

Блок 11. За розрахованими значеннями цільової функції f , її градієнта A^f_q і попереднім значенням параметрів, що діагностуються $q^{i-1}_{\text{розр}}$ за допомогою методу оптимізації ДФП розраховуються нові значення параметрів $q^i_{\text{розр}}$.

Блок 12. Перевірка відповідності критерію зупинки: якщо збільшення параметрів менше заданої малої величини E_{ps} , то процес оптимізації закінчується, якщо ні - наступна ітерація процесу оптимізації (повернення до блоку 9).

Блок 13. Фіксуються отримані внаслідок оптимізації значення параметрів $q_{\text{розр}}$.

Блок 14. Перевірка кількості реалізацій циклів оптимізації з різних початкових точок q_0 .

Блок 15. Організація циклу оптимізації із різних початкових точок. При цьому початкова точка \mathbf{q}_0 переміщується в межах обмежень $\Delta \mathbf{q}^{\text{обм}} = k \cdot \Delta \mathbf{q}^{\text{доп}}$.

Блок 16. Ухвалення рішення за результатами оптимізації з різних початкових точок у межах $\Delta \mathbf{q}^{\text{обм}} = k \cdot \Delta \mathbf{q}^{\text{доп}}$. При цьому можливі три варіанти:

I=1 - Зафіксовані в блоці 14 значення параметрів, що діагностуються $\mathbf{q}_{\text{розр}}$ хоча б раз суттєво відрізняються від номінальних $\mathbf{q}_{\text{ном}}$, заданих у блоці 4 (похибка $\delta \gg 1\%$).

Висновок: діагностованість не забезпечена, необхідно повертатися до блоку 3 і наново вибирати вхідні впливи або вихідні характеристики.

I=2 - Зафіксовані в блоці 13 значення параметрів, що діагностуються $\mathbf{q}_{\text{розр}}$ наближаються до номінальних, але хоча б раз точність недостатня (похибка $\delta > 1\%$).

Висновок: недостатня точність діагностування, необхідно повертатися до блоку 8 і зменшувати параметр E_{ps} .

I=3 - Зафіксовані в блоці 14 значення параметрів, що діагностуються $\mathbf{q}_{\text{расч}}$ завжди збігаються з номінальними з необхідною точністю (похибка $\delta < 1\%$).

Висновок: Діагностованість забезпечена в області можливих значень параметрів, що діагностуються, обмеженою $\Delta \mathbf{q}^{\text{обм}} = k \cdot \Delta \mathbf{q}^{\text{доп}}$.

Блок 17. Перевірка того, чи потрібно розширювати область діагностовності.

Блок 18. Присвоєння змінним значення $n = 1$, $k = k + 1$, і повернення до блоку 8, тобто повторення етапу забезпечення діагностовності для більш широкої області можливих значень параметрів, що діагностуються.

Блок 19. Виведення значень вхідних тестових впливів \mathbf{X} , вихідних характеристик \mathbf{Y} , обмежень на параметри $\Delta \mathbf{q}^{\text{обм}}$ та параметра оптимізації E_{ps} , необхідних процесу діагностування систем на етапі їх виробництва.

Кінець алгоритму забезпечення діагностування системи.

Таким чином, завданням забезпечення діагностування у розробленому методі є завдання знаходження глобального мінімуму цільової функції (2.4).

Перевірка цього проводиться в такий спосіб. Усі параметри елементів вузла задаються номінальними та розраховуються відповідні їм номінальні вихідні характеристики.

Потім ці вихідні характеристики підставляються в цільову функцію (2.4) як виміряні, а початкові значення параметрів елементів задаються відхиленнями від номінальних випадковим чином.

Якщо в результаті оптимізації значення параметрів стають рівними номінальним, отже глобальний мінімум знайдено. Для того, щоб глобальний мінімум був знайдений з будь-якої початкової точки, необхідно:

- накладати обмеження на можливі значення параметрів елементів (зазвичай 2-3 допуски);
- включати до цільової функції (2.4) додаткові вихідні характеристики.

При цьому порядок вибору характеристик наступний. В першу чергу характеристики, що знімаються із зовнішніх вузлів схеми (входи, виходи, кола живлення) у функціональному режимі, потім характеристики, що знімаються з доступних внутрішніх вузлів схеми.

Якщо цих характеристик недостатньо, то на вхід подаються тестові впливи та знімаються вихідні характеристики із зовнішніх або доступних внутрішніх вузлів схеми.

При цьому тестові вхідні впливи повинні бути безпечними для системи та вибиратися з урахуванням можливостей контрольно-вимірювальної апаратури, яка застосовуватиметься на етапі виробництва системи.

Розроблений алгоритм покладено в основу відповідних програмних модулів, які розглянуто у розділі 3 даної роботи.

Після забезпечення діагностовності системи на етапі її проектування перейдемо до розробки алгоритму діагностування параметрів та режимів роботи комплектуючих елементів на етапі виробництва та експлуатації системи.

2.5 Розробка алгоритму діагностування внутрішніх параметрів технічних систем

У цьому підрозділі наведено алгоритм автоматизованого діагностування параметрів комплектуючих елементів технічних систем, згідно з яким за допомогою контрольно-вимірювальної апаратури на систему подаються вхідні впливи та вимірюються її вихідні характеристики, вибрані на етапі забезпечення діагностовності, а потім за виміряними характеристиками розраховуються значення параметрів елементів системи та їх режимів роботи, які порівнюються із допустимими.

При розробці алгоритму діагностування виходитимемо з того, що попередньо забезпечено діагностовність системи, як це запропоновано в підрозділі 2.3.

Блок-схема алгоритму діагностування параметрів та режимів роботи комплектуючих елементів на прикладі радіоелектронної системи наведено на рисунку 2.3.

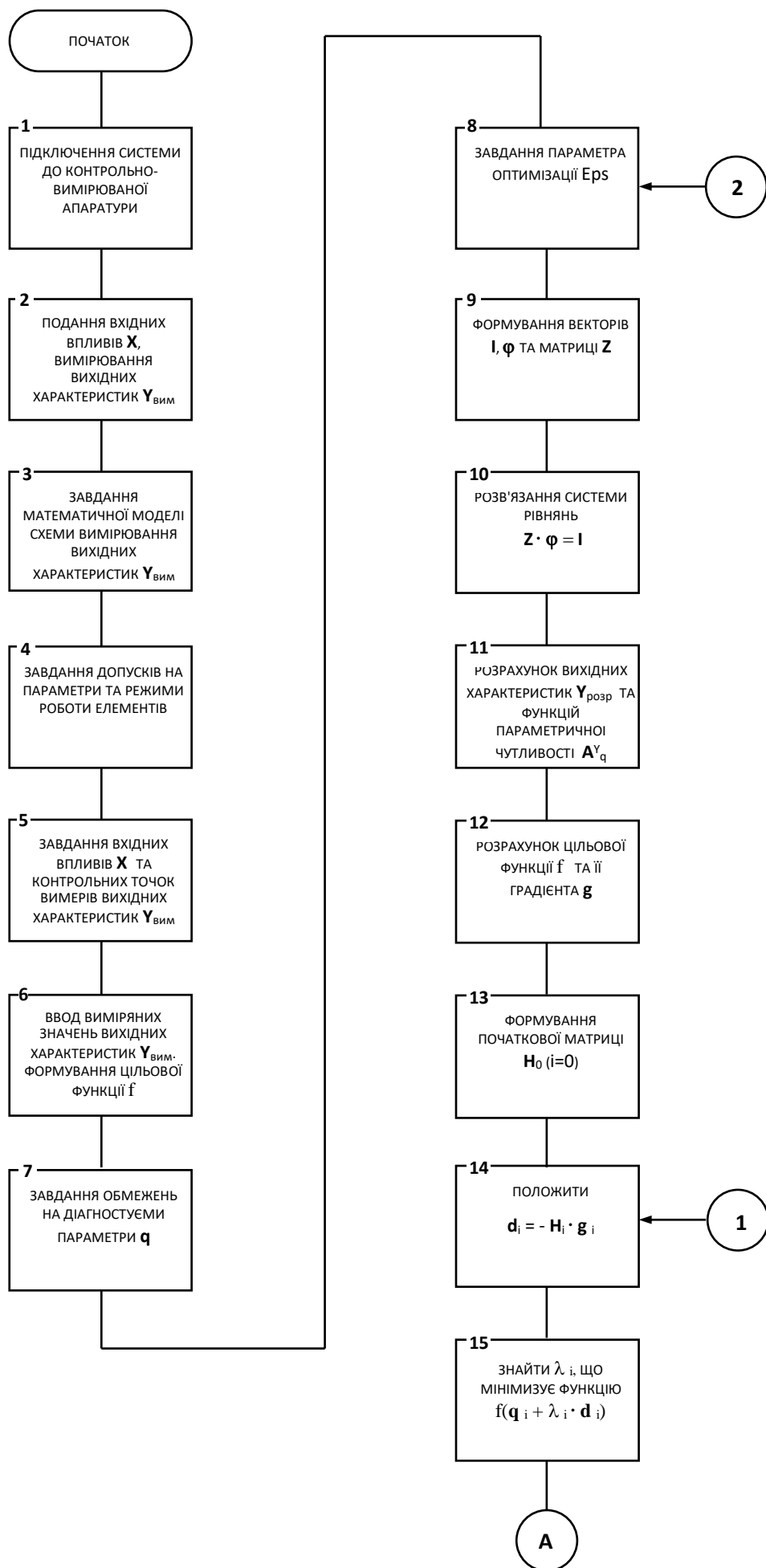
При цьому зміст блоків структурної схеми алгоритму наступний.

Початок алгоритму діагностування параметрів та режимів роботи системи.

Блок 1. Підключення діагностованої системи до контрольно-вимірювальної апаратури з урахуванням обраних на етапі забезпечення діагностовності вхідних тестових впливів та вихідних характеристик.

Блок 2. Подача на вхід системи, що діагностується, обраних на етапі забезпечення діагностування вхідних впливів X і вимірювання вихідних характеристик $Y_{\text{вим}}$.

Блок 3. Введення в комп'ютер моделі схеми вимірювання вихідних характеристик, зібраної в блоці 1, з урахуванням параметрів і схем включень контрольно-вимірювальних приладів.



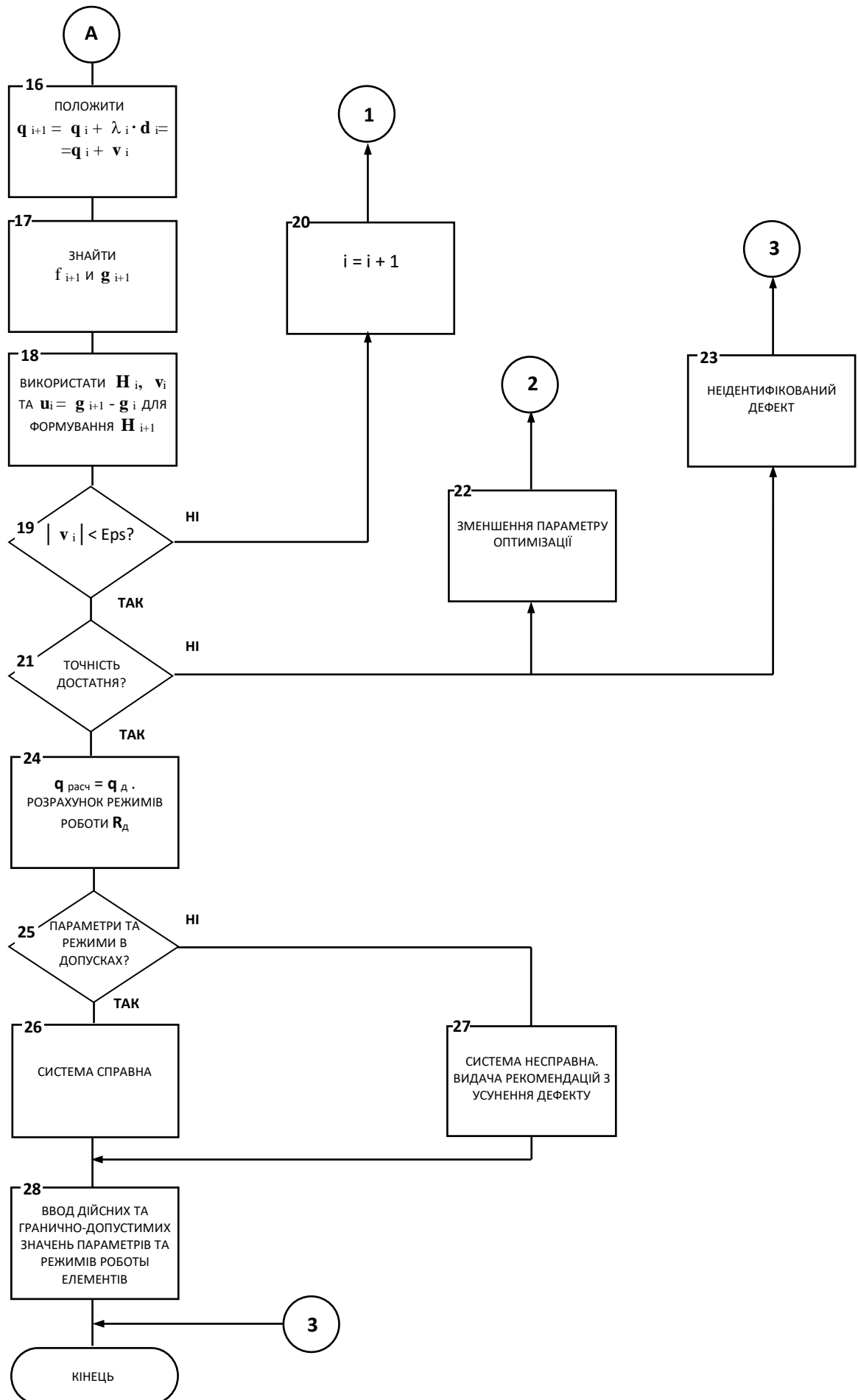


Рисунок 2.3 - Алгоритм діагностування внутрішніх параметрів технічних систем

Блок 4. Встановлення допусків на значення параметрів Δq^H , Δq^B та режимів роботи $R^{доп}$ комплектуючих елементів.

Блок 5. Завдання необхідних для розрахунку значень вхідних тестових впливів X та контрольних точок вимірювання вихідних характеристики системи $Y_{вим}$.

Блок 6. Введення вимірних у блоці 2 значень вихідних характеристик системи $Y_{вим}$ та формування в аналітичному вигляді цільової функції f згідно з формулою (2.4).

Блок 7. Завдання обмежень $\Delta q^{обм}$ на параметри, що діагностуються q , отримані на етапі забезпечення діагностування.

Блок 8. Завдання значення параметра оптимізації Eps , отриманого на етапі забезпечення діагностовності системи.

Блок 9. На основі введеної в блоці 3 схеми формування її аналітичної моделі: вектора вузлових струмів I , вузлових потенціалів ϕ та матриці вузлових провідностей Z .

Блок 10. Розв'язання математичної моделі схеми у вигляді системи рівнянь $Z \cdot \phi = I$ відносно вектора вузлових потенціалів ϕ .

Блок 11. За розрахованими значеннями вузлових потенціалів ϕ проводиться розрахунок вихідних характеристик системи $Y_{розр}$ та їх функцій параметричної чутливості A^Y_q до зміни значень параметрів, що діагностуються q .

Блок 12. За вимірними та розрахунковими значеннями вихідних характеристик $Y_{вим}$ та $Y_{розр}$ відповідно, проводиться розрахунок значення цільової функції f та її вектора градієнта g , елементи якого є функцією параметричної чутливості цільової функції до зміни значень параметрів, що діагностуються. A^f_q .

Блок 13. Формування початкової матриці H_0 ($i = 0$ - номер ітерації процесу оптимізації), що є одиничною матрицею.

Блок 14. Як напрям пошуку мінімуму цільової функції прийняти напрям $\mathbf{d}_i = -\mathbf{H}_i \cdot \mathbf{g}_i$.

Блок 15. Щоб знайти функцію λ_i , мінімізуючу функцію $f(\mathbf{q}_i + \lambda_i \mathbf{d}_i)$, зробити одномірний пошук вздовж прямої $\mathbf{q}_i + \lambda_i \mathbf{d}_i$.

Блок 16. Розрахунок нових значень параметрів, що діагностуються, на $i + 1$ -й ітерації за формулою $\mathbf{q}_{i+1} = \mathbf{q}_i + \lambda_i \mathbf{d}_i$.

Блок 17. Розрахунок цільової функції f_{i+1} та її градієнта \mathbf{g}_{i+1} для значень параметрів \mathbf{q}_{i+1} .

Блок 18. Використовуючи \mathbf{H}_i , \mathbf{v}_i та $\mathbf{u}_i = \mathbf{g}_{i+1} - \mathbf{g}_i$ оновити матрицю \mathbf{H} .

Блок 19. Завершити процес оптимізації, якщо величина $|\mathbf{v}_i|$ досить мала. Інакше продовжити.

Блок 20. Збільшити i на одиницю та повернутися до блоку 14.

Блок 21. Перевірка того, чи достатня точність збігу розрахункових та вимірних вихідних характеристик.

Блок 22. Якщо попередня умова не виконується, необхідно зменшити параметр оптимізації Eps .

Блок 23. Висновок про наявність у системі неідентифікованого дефекту.

Блок 24. Розраховані із застосуванням методу оптимізації значення параметрів $\mathbf{q}_{\text{розр}}$ приймаються як дійсні значення діагностованих параметрів \mathbf{q}_d , для яких розраховуються режими роботи елементів у робочому режимі системи \mathbf{R}_d .

Блок 25. Перевірка того, чи є дійсні значення параметрів елементів \mathbf{q}_d та їх режими роботи \mathbf{R}_d у межах, встановленими допусками на них, що були введені в блоці 4.

Блок 26. Якщо всі дійсні значення параметрів та режимів роботи елементів лежать у допустимих межах, технічний стан системи класифікується як справний.

Блок 27. Якщо дійсне значення хоча б одного параметра або режиму роботи елемента виходить за допустимі межі, технічний стан системи

класифікується як несправний та видаються рекомендації щодо усунення дефекту.

Блок 28. Виведення дійсних та гранично-допустимих значень параметрів та режимів роботи всіх елементів, що комплектують систему для уточнення діагнозу.

Кінець алгоритму діагностування параметрів та режимів роботи системи.

В даному випадку гранично-допустимі значення параметрів визначаються з урахуванням лише технологічних розкидів параметрів елементів системи, що характерно для діагностування системи на етапі її виробництва.

При діагностуванні технічного стану системи в процесі її експлуатації відмінність полягає лише у значеннях гранично-допустимих значень параметрів, які в такому разі, крім технологічних розкидів, включатимуть розкиди, пов'язані з умовами експлуатації (температура, старіння тощо).

Розроблений алгоритм покладено основою комп'ютерної програмної системи автоматизованого діагностування параметрів і режимів роботи комплектуючих елементів технічної системи, що розглянутий у наступному розділі.

2.6 Висновки за розділом 2

1. Визначено вимоги до методу діагностування параметрів елементів технічної системи на етапі її виробництва та експлуатації.

2. Розроблено метод діагностування параметрів елементів системи, заснований на отриманні дійсних значень параметрів та режимів роботи елементів розрахунковим шляхом на основі експериментально отриманих вихідних характеристик системи із застосуванням методу оптимізації та порівняння їх з допустимими.

3. Розроблено діагностичну модель технічної системи, що складається із системи рівнянь, що є математичною моделлю системи в базисі вузлових потенціалів (на прикладі радіоелектронної системи), цільової функції, до якої входять виміряні та розрахункові значення вихідних характеристик системи, вибраних на етапі проектування системи з урахуванням забезпечення її діагностованості, та рівняння, що пов'язують обрані вихідні характеристики системи та потенціали у вузлах схеми.

4. Розроблено алгоритм забезпечення діагностованості системи на стадії її проектування.

5. Розроблено алгоритм діагностування параметрів елементів системи на етапі її виробництва та експлуатації.

3 РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ВНУТРІШНІХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Однією з основних частин роботи є розробка комп'ютерної системи, що дозволяє автоматизувати процес діагностування параметрів елементів, що комплектують технічну систему, а також забезпечити діагностовність системи на стадії її проектування.

Як раніше зазначалося, найефективніший варіант побудови такої комп'ютерної системи – на базі САПР, за допомогою якої проектується технічна система і яка включає бібліотеку моделей всіх елементів, з яких будується система, що проектується, і яка забезпечує досить високу точність математичного моделювання роботи системи.

У цьому розділі розглянуто питання практичної реалізації комп'ютерної системи діагностування параметрів елементів технічної системи на основі запропонованого в розділі 2 методу діагностування.

3.1 Вимоги до комп'ютерної системи діагностування

Основні вимоги, що пред'являються до комп'ютерної системи автоматизованого діагностування параметрів елементів технічної системи, що розробляється, необхідно розглядати з двох взаємопов'язаних точок зору: функціональних можливостей та організації її програмного забезпечення.

Вимоги до функціональних можливостей комп'ютерної системи впливають із предметної галузі її застосування – процесів автоматизованого проектування та діагностування параметрів елементів технічних систем. Виходячи з цього, вимоги можна сформулювати так:

- комп'ютерна система повинна дозволяти проводити аналіз та забезпечення діагностовності технічної системи на етапі її проектування;
- отримувати на основі його результатів необхідні тестові вхідні впливи та контрольні точки вимірювань вихідних характеристик системи;
- в результаті експериментального вимірювання вихідних характеристик системи отримувати інформацію про причини несправності системи, що діагностується.

Практична реалізація перерахованих функціональних можливостей може бути виконана на основі методу та алгоритмів, викладених у розділі 2.

З точки зору організації програмного забезпечення комп'ютерна система повинна задовольняти такі вимоги:

- мати блочно-модульну структуру, яка дозволяє ефективним чином доповнювати її іншими функціональними блоками та програмними модулями, що розширюють її функціональні можливості;
- мати можливість функціонування як в автономному режимі, так і в складі інтегрованої САПР;
- бути відкритою до появи нових чисельних методів аналізу, що використовуються під час функціонування комп'ютерної системи з метою

підвищення ефективності її застосування у процесі проектування та діагностування технічних систем;

- мати у своєму складі базу даних про гранично допустимі значення параметрів і режимів роботи елементів системи.

3.2 Розробка структурної схеми та алгоритму функціонування комп'ютерної системи діагностування

З урахуванням наведених вимог та запропонованого методу діагностування параметрів та режимів роботи елементів технічних систем, покладеного в основу роботи комп'ютерної системи, було розроблено структурну схему комп'ютерної системи діагностування [41,42], склад якої наведено на рисунку 3.1.

Структурна схема складається з керуючої програми та функціональних блоків, відображає керуючі зв'язки між ними, а також функціональне призначення кожного блоку в процесі роботи комп'ютерної системи.

Структурне розбиття комп'ютерної системи діагностування на ряд функціональних блоків виконано відповідно до основних завдань, які вирішуються нею в процесі функціонування, з метою забезпечення діагностовності та автоматизованого діагностування параметрів та режимів роботи комплектуючих технічну систему. Наведене розбиття комп'ютерної системи діагностування виконано також з урахуванням принципів взаємозамінності, вкладеності та перекриття окремих функціональних блоків [43].

У свою чергу, кожен блок структурної схеми є набором програмних модулів, об'єднаних в блок з точки зору функціонального призначення. Програмні модулі блоків, будучи складовими частинами їх структури, вирішують

часткові завдання функціональних блоків щодо реалізації окремих методів та обчислювальних процедур.



Рисунок 3.1 - Склад комп'ютерної системи діагностування

Таким чином, з урахуванням вищевикладеного, можна зробити висновок про відкритість комп'ютерної системи для внесення, у разі потреби, відповідних модифікацій, а також можливості досягнення економії оперативної пам'яті комп'ютера за рахунок перекриття блоків та програмних модулів усередині блоків.

Включення комп'ютерної системи діагностування у роботу відповідної САПР здійснюється з урахуванням наявних у САПР програмних модулів, які разом із новими програмними модулями розширяють можливості САПР щодо діагностування.

При цьому монітор системи викликає керуючу програму, здійснює передачу адрес необхідної комп'ютерній системі описової та керуючої інформації в проектному файлі бази даних (ПФБД), а по завершенні роботи комп'ютерної системи здійснюється запис ПФБД результатів її функціонування.

Функціональне призначення керуючої програми та функціональних блоків структурної схеми системи діагностування відповідає наведеному нижче опису.

Керуюча програма системи діагностування в залежності від вихідної керуючої інформації, управляє роботою системи, формуючи послідовності програмних модулів функціональних блоків для досягнення поставленого завдання. За наявності помилок у вихідних даних або їх виникнення у процесі обчислення програма приймає рішення щодо доцільності проведення подальших розрахунків.

Введення та обробка вихідної інформації включають:

- транслятор вихідної інформації, що здійснює введення та перетворення вхідної мови системи діагностування у внутрішні структури даних та синтаксичний контроль вхідних даних;
- редактор вихідної інформації здійснює редагування повної описової інформації про схему технічної системи, що діагностується;
- програма введення схеми діагностованої технічної системи здійснює введення схеми у графічному вигляді;

- програма введення та обробки вимірних значень вихідних характеристик діагностованої системи для підключення у вхідний потік вихідної інформації про значення тестових впливів та реакцій схеми;

- програма введення номінальних та гранично допустимих значень параметрів та режимів роботи елементів для їх подальшого порівняння з дійсними значеннями параметрів та режимів;

- програма введення обмежень на значення параметрів, що діагностуються, що використовуються при розв'язанні діагностичної моделі системи методом оптимізації значень параметрів;

- програма введення значень параметрів оптимізації, необхідних у процесі оптимізації.

Формування діагностичної моделі технічної системи включає наступні програмні модулі:

- формування за введеною схемою технічної системи, що діагностується, її математичної моделі;

- формування цільової функції оптимізації за введеними раніше вимірними значеннями вихідних характеристик системи;

- формування функцій чутливості цільової функції до зміни значень параметрів, що діагностуються.

Розрахунок діагностичної моделі системи включає такі програмні модулі:

- розв'язання систем рівнянь;

- обчислення цільової функції оптимізації значень параметрів, що діагностуються;

- обчислення функцій чутливості цільової функції до зміни значень параметрів, що діагностуються;

- програма розрахунку значень параметрів, що діагностуються;

- програма розрахунку режимів роботи елементів.

Виведення та інтерпретація результатів діагностування включає програмні модулі:

- програма виведення розрахованих значень параметрів, що діагностуються, і режимів роботи елементів, що комплектують діагностовану систему;
- програма порівняння розрахованих значень параметрів, що діагностуються, і режимів роботи елементів з їх гранично-допустимими значеннями;
- програма інтерпретації результатів діагностування та класифікація технічного стану діагностованої системи та видача рекомендацій щодо усунення дефекту.

На рисунку 3.2 показано блок-схему розробленої комп'ютерної системи діагностування, де виділені штрихуванням та обведені пунктирною лінією ті програмні модулі, які вже були створені раніше і увійшли до складу відповідної існуючої САПР а системою діагностування, що розробляється, тільки використовуються. Стрілки на схемі показують напрямки передачі даних між модулями.

Іншим важливим завданням розробки комп'ютерної системи діагностування параметрів та режимів роботи елементів технічних систем є розробка алгоритму її функціонування. Алгоритм функціонування системи діагностування реалізується керуючою програмою, яка здійснює координовану взаємодію програмних модулів та забезпечує виконання тих чи інших процедур.

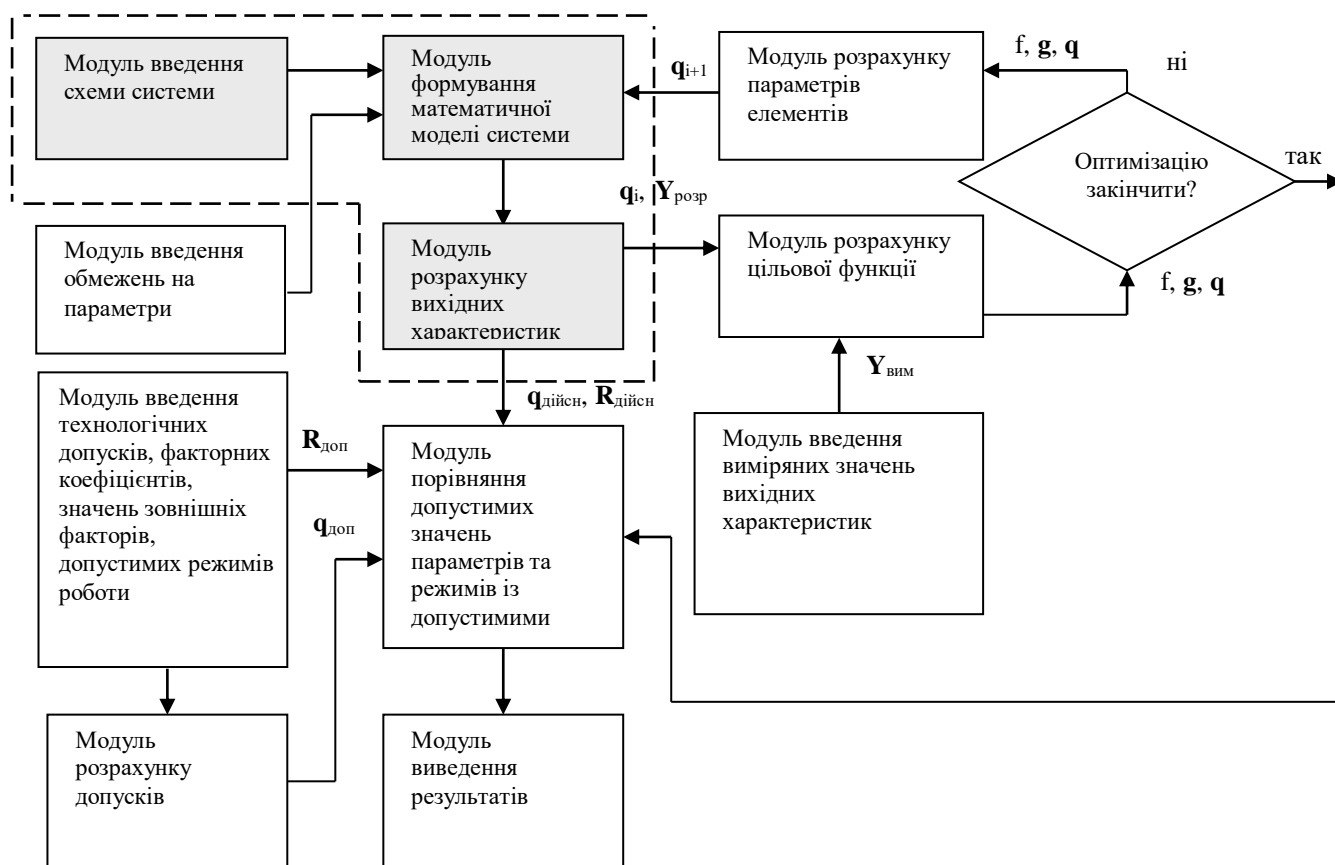
Основою розробки алгоритму функціонування системи діагностування, блок-схема якого наведено на рисунку 3.3 є метод, запропонований у розділі 2, вимоги до системи діагностування, сформульовані в підрозділі 3.1 і склад програмних модулів системи діагностування.

Зміст блоків на схемі алгоритму наступний.

Початок алгоритму функціонування системи діагностування.

Блок 1. Ініціалізація змінних та масивів.

Блок 2. Введення та трансляція всієї необхідної для функціонування комп'ютерної системи вихідної інформації.



q – вектор значень параметрів елементів,
 R – вектор значень режимів роботи елементів,
 Y – вектор значень вихідних характеристик,
 f, g – цільова функція оптимізації та її градієнт

Рисунок 3.2 - Блок-схема системи діагностування

Блок 3. Перевірка правильності введення вихідної інформації.

Блок 4. Редагування вихідної інформації у разі неправильного введення.

Блок 5. Розв'язання математичної моделі діагностованої технічної системи, тобто. розрахунок всіх вихідних показників системи, які входять у цільову функцію.

Блок 6. Розрахунок цільової функції оптимізації значень параметрів, що діагностуються.

Блок 7. Оптимізація значень параметрів елементів системи, що діагностуються.

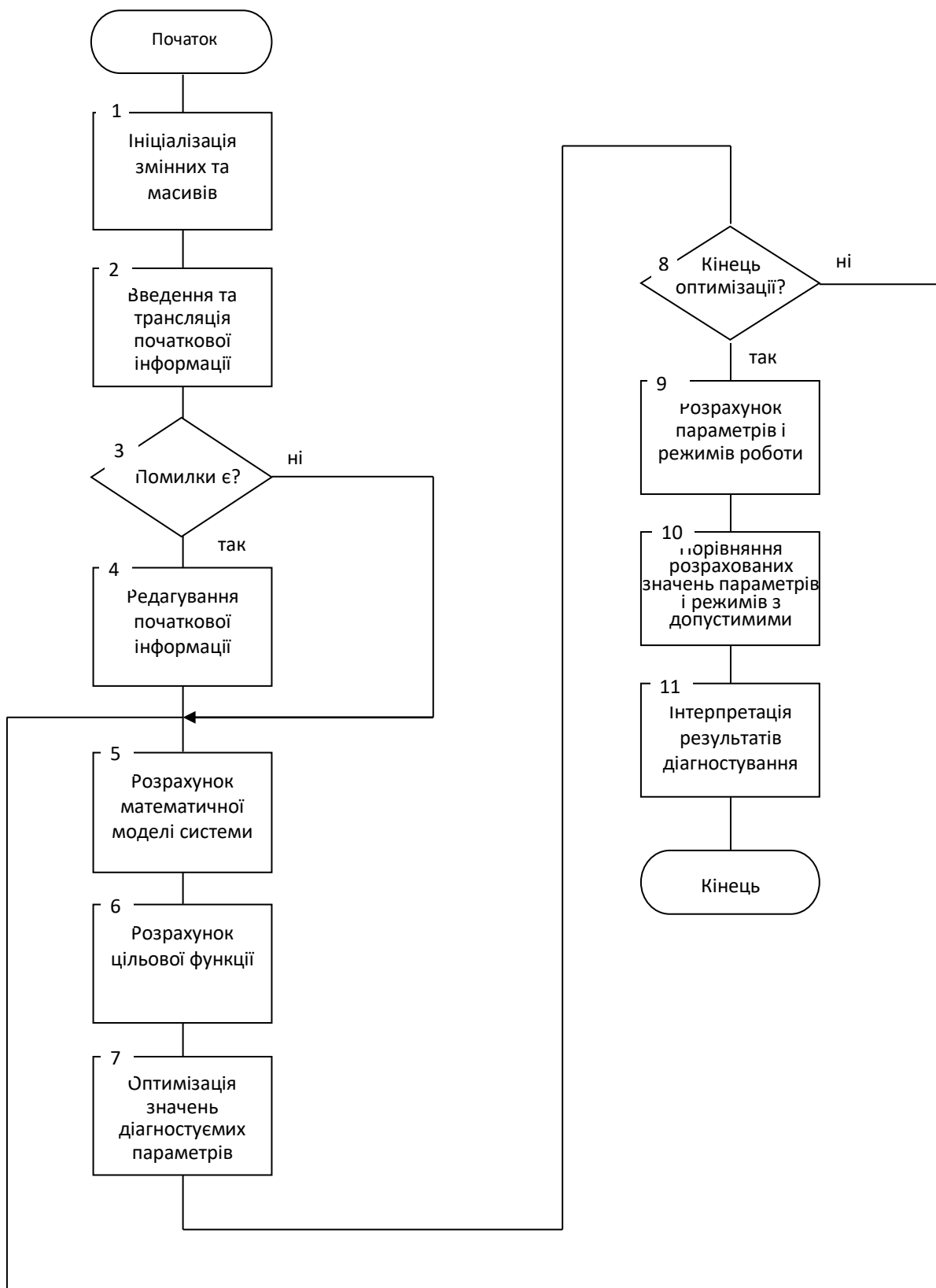


Рисунок 3.3 - Блок-схема алгоритму функціонування системи діагностування

Блок 8. Перевірка критерію завершення процесу оптимізації значень параметрів, що діагностуються.

Блок 9. Розрахунок параметрів та режимів роботи, що комплектують діагностовану систему.

Блок 10. Порівняння розрахованих значень параметрів і режимів роботи елементів системи з гранично допустимими значеннями.

Блок 11. Інтерпретація результатів розрахунків та діагностування, тобто виведення розрахованих значень параметрів та режимів роботи елементів та за результатами їх порівняння з гранично допустимими значеннями класифікація технічного стану діагностованої технічної системи.

Кінець алгоритму функціонування системи діагностування.

Розроблені структура та алгоритм функціонування системи діагностування дозволяють створити ефективний програмний продукт, який відповідає вимогам, сформульованим у підрозділі 3.1.

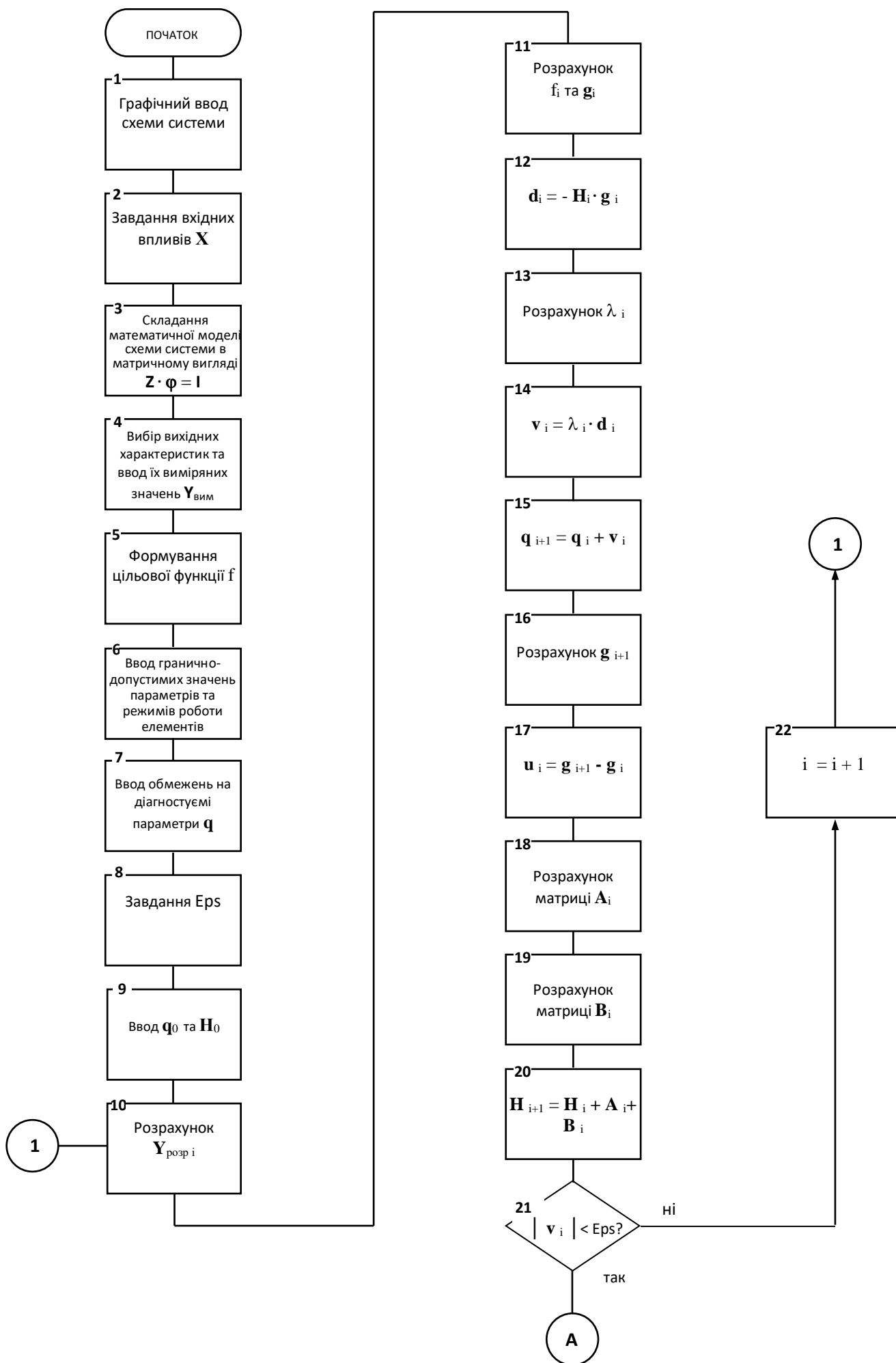
3.3 Розробка алгоритму функціонування програмних модулів комп'ютерної системи діагностування

Основним модулем розробленої системи діагностування елементів технічних систем є модуль розрахунку значень параметрів, що діагностуються із застосуванням методу оптимізації. Тому під час розгляду алгоритму функціонування програмних модулів системи діагностування цей модуль розглянуто докладніше.

Оптимізація проводиться методом Давидона-Флетчер-Пауелла.

Блок-схема алгоритму функціонування програмних модулів комплексу діагностування наведено рисунку 3.4.

Зміст блоків на схемі алгоритму наступний.



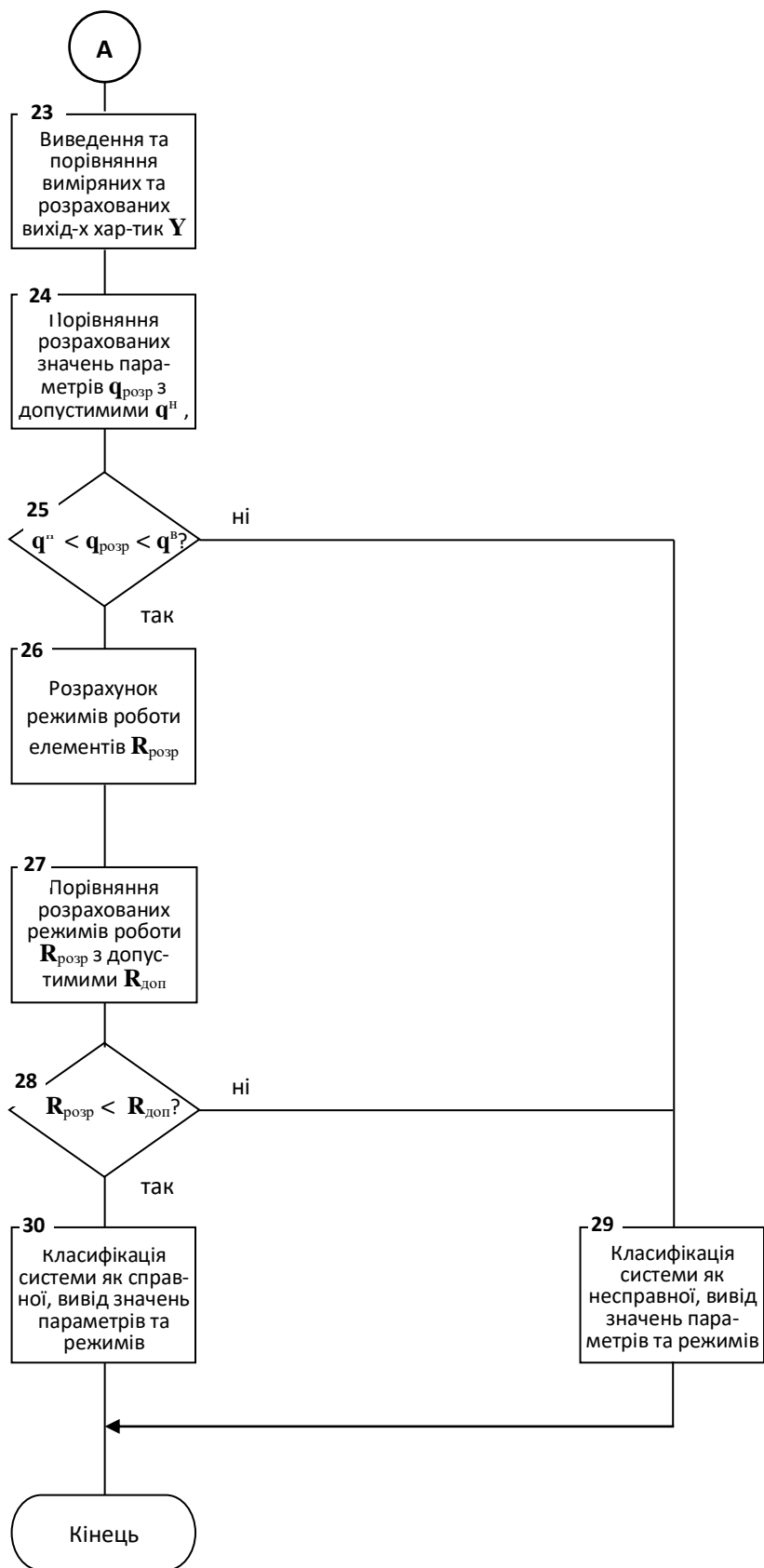


Рисунок 3.4 - Блок-схема алгоритма функціонування програмних модулів

Початок алгоритму функціонування програмних модулів системи діагностування.

Блок 1. Графічне введення схеми вимірювання вихідних характеристик системи, що діагностується.

Блок 2. Завдання вхідних впливів \mathbf{X} .

Блок 3. За введеною схемою вимірювань вихідних характеристик системи та заданим вхідним впливам автоматичне складання математичної моделі діагностованої системи в матричному вигляді. На прикладі радіоелектронної системи - $\mathbf{Z} \cdot \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{I}$, де \mathbf{Z} - матриця вузлових провідностей, $\boldsymbol{\varphi}$ - вектор вузлових потенціалів, \mathbf{I} - вектор вузлових струмів.

Блок 4. Вибір вихідних характеристик системи, необхідних для однозначного визначення всіх параметрів системи, що діагностуються, та завдання їх вимірних значень $\mathbf{Y}_{\text{вим}}$.

Блок 5. Автоматичне формування цільової функції виду

$$f(\mathbf{q}) = \sum_{j=1}^M \sum_{r=1}^{P_j} \left(\frac{Y_{j,r,\text{розра}}(\mathbf{q})}{Y_{j,r,\text{вим}}(\mathbf{q})} - 1 \right)^2,$$

де $Y_{j,r,\text{розра}}(\mathbf{q})$, $Y_{j,r,\text{вим}}(\mathbf{q})$ - відповідно розрахункове та вимірне значення r -го відліку j -ї вихідної характеристики; M - число вихідних характеристик; P_j - число відліків (вимірів) j -ї вихідної характеристики.

Блок 6. Введення гранично допустимих значень параметрів та режимів роботи елементів, необхідних для порівняння з їх дійсними значеннями та класифікації технічного стану системи [45].

Блок 7. Введення обмежень на значення параметрів, що діагностуються, необхідних у процесі їх обчислень із застосуванням оптимізації.

Блок 8. Введення критерію зупинки оптимізації ϵ_{ps} .

Блок 9. Розрахунок початкових значень параметрів, що діагностуються за заданими на них обмеженнями і завдання матриці \mathbf{H}_0 (зазвичай одинична матриця).

Блок 10. Розв'язання математичної моделі системи (для радіоелектронної системи відносно вектора вузлових потенціалів) та обчислення вихідних характеристик системи, що входять до цільової функції $\mathbf{Y}_{\text{розр}}$.

Блок 11. Розрахунок цільової функції f за заданими вимірними та розрахованими значеннями вихідних характеристик і градієнта цільової функції \mathbf{g}_i .

Блок 12. Розрахунок напрямку пошуку $\mathbf{d}_i = -\mathbf{H}_i \cdot \mathbf{g}_i$, де \mathbf{H}_i - позитивно визначена симетрична матриця, яка оновлюється на кожному кроці, як це буде описано нижче, \mathbf{g}_i - вектор-градієнт цільової функції f .

Блок 13. Щоб знайти функцію λ_i , що мінімізує функцію $f(\mathbf{q}_i + \lambda_i \cdot \mathbf{d}_i)$, зробити одномірний пошук вздовж прямої $\mathbf{q}_i + \lambda_i \cdot \mathbf{d}_i$.

Блок 14. Розрахунок прирощень значень параметрів, що діагностуються $\mathbf{v}_i = \lambda_i \cdot \mathbf{d}_i$, де λ_i - крок прирощення параметрів, \mathbf{d}_i - напрям пошуку.

Блок 15. Розрахунок нових значень параметрів, що діагностуються $\mathbf{q}_{i+1} = \mathbf{q}_i + \mathbf{v}_i$, де \mathbf{q}_{i+1} - значення параметрів на $i+1$ -й ітерації, \mathbf{q}_i - значення параметрів на i -й ітерації, \mathbf{v}_i - прирощення значень параметрів на i -й ітерації.

Блок 16. Знайти нові значення вектора градієнта цільової функції \mathbf{g}_{i+1} .

Блок 17. Розрахувати прирощення градієнта $\mathbf{u}_i = \mathbf{g}_{i+1} - \mathbf{g}_i$, де \mathbf{g}_{i+1} - вектор градієнт цільової функції на $i + 1$ -й ітерації, \mathbf{g}_i - вектор градієнт цільової функції на i -й ітерації.

Блок 18. Розрахунок матриці \mathbf{A}_i

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^T / (\mathbf{v}_i^T \cdot \mathbf{u}_i),$$

де \mathbf{v}_i - вектор прирощень значень параметрів, \mathbf{v}_i^T - транспонований вектор прирощень значень параметрів, \mathbf{u}_i - вектор прирощень градієнта цільової функції.

Блок 19. Розрахунок матриці \mathbf{B}_i

$$\mathbf{V}_i = -\mathbf{H}_i \cdot \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{H}_i / (\mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{u}_i),$$

де \mathbf{H}_i - матриця \mathbf{H} на i -й ітерації, \mathbf{u}_i - вектор прирощень градієнта, \mathbf{u}_i^T - транспонований вектор прирощень градієнта.

Блок 20. Оновити матрицю \mathbf{H} наступним чином:

$$\mathbf{H}_{i+1} = \mathbf{H}_i + \mathbf{A}_i + \mathbf{V}_i,$$

де \mathbf{H}_{i+1} - матриця \mathbf{H} на $i+1$ -й ітерації, \mathbf{H}_i - матриця \mathbf{H} на i -й ітерації, \mathbf{A}_i - матриця \mathbf{A} на i -й ітерації, \mathbf{V}_i - матриця \mathbf{V} на i -й ітерації.

Блок 21. Завершити процедуру оптимізації значень параметрів, якщо величина $|\mathbf{v}_i|$ достатньо мала. Інакше продовжити.

Блок 22. Збільшити на одиницю i і повернутися до блоку 10.

Блок 23. Виведення на екран та порівняння вимірених та розрахункових вихідних характеристик системи \mathbf{Y} .

Блок 24. Порівняння отриманих розрахунковим шляхом значень параметрів, що діагностуються $\mathbf{q}_{\text{розр}}$ і порівняння їх з їх гранично допустимими значеннями $\mathbf{q}^{\text{н}}$ та $\mathbf{q}^{\text{в}}$.

Блок 25. Якщо розрахункові значення параметрів перебувають у допусках - перехід до блоку 26; якщо ні – то до блоку 29.

Блок 26. За розрахованими значеннями параметрів елементів та математичної моделі системи розрахунок режимів роботи елементів.

Блок 27. Порівняння розрахованих значень режимів роботи елементів зі своїми допустимими значеннями.

Блок 28. Якщо режими роботи елементів лежать у допустимих межах, перехід до блоку 30, якщо ні – то до блоку 29.

Блок 29. Класифікація системи як несправної, виведення всіх значень параметрів та режимів роботи елементів та видача рекомендацій щодо усунення несправності.

Блок 30. Класифікація системи як справної, виведення всіх значень параметрів і режимів роботи елементів.

Кінець алгоритму функціонування програмних модулів системи діагностування.

3.4 Програмна реалізація системи діагностування

Завданням програмної реалізації системи діагностування є отримання програмного продукту, що задовольняє вимогам до якості програмного забезпечення [46,47] на основі комплексного використання як загальних принципів структурного програмування, так і деяких часткових рішень та рекомендацій, що дозволяють покращити найважливіші показники комплексу - витрати машинного часу та оперативної пам'яті.

При виконанні програмної реалізації системи були використані певні практичні рекомендації та прийоми, що дозволяють підвищити ефективність системи з погляду витрат оперативної пам'яті комп'ютера, необхідної для роботи системи та витрат машинного часу, необхідного для вирішення практичних завдань діагностування.

До них насамперед слід віднести:

1) Застосування модифікації чисельного методу розв'язання систем нелінійних алгебраїчних рівнянь - методу Ньютона-Рафсона з метою розширення області його збіжності та алгоритмічної надійності при аналізі електричних процесів у системах;

2) Обчислення функцій параметричної чутливості вихідних показників шляхом прирощень;

3) Застосування для оптимізації значень параметрів, що діагностуються методу Давидона-Флетчера-Пауелла.

Для розв'язання на кожному етапі оптимізації значень параметрів систем нелінійних алгебраїчних рівнянь використовується ітераційний метод Ньютона-Рафсона [48,49,50]. Переваги цього методу в тому, що, по-перше, він завжди має область збіжності і, по-друге, забезпечує високу швидкість збіжності: квадратичну в порівнянні з іншими методами.

Недоліками методу є мінімальний розмір області збіжності (зазвичай менше, ніж методу простих ітерацій), необхідність завдання вектора початкового

наближення досить близько до точки рішення, інакше ітерації методу можуть не сходитися.

На практиці достовірно задати початкове наближення поблизу точки рішення неможливо, тому у ролі початкового вибирається нульове початкове наближення.

Для забезпечення збіжності та в цілому алгоритмічної надійності методу Ньютона-Рафсона застосовують різні його модифікації.

Одним із методів, що модифікує метод Ньютона-Рафсона є метод продовження рішення за параметром [50].

Він полягає у наступному. Позначимо через S параметр, що змінюється від 0 до 1. Введемо систему алгебраїчних рівнянь $H(\varphi, S) = 0$ таку, що при $S = 0$ система $H(\varphi, 0) = 0$ має відоме рішення φ^0 , а при $S=1$ система $H(\varphi, 1) = 0$ має рішення φ^* , відповідне рішення початкової системи.

Систему $H(\varphi, S) = 0$ можна отримати у різний спосіб. При цьому основна вимога полягає в тому, щоб $H(\varphi, S)$ була безперервною в діапазоні зміни S від 0 до 1. Тоді, змінюючи S від 0 до 1 і вирішуючи для кожного S_j систему $H(\varphi, S_j) = 0$ методом Ньютона-Рафсона, можна знайти послідовність $\varphi^0, \varphi^1, \varphi^2, \dots, \varphi^*$.

Оскільки φ^0 при $S = 0$ відомо, то завжди можна знайти S_1 , досить близьке до S_0 , при якому будуть виконуватися умови збіжності методу Ньютона-Рафсона і для $S_2, S_3, \dots, S_n = 1$.

Один із можливих способів побудови $H(\varphi, S)$ призводить до наступної системи рівнянь:

$$H(\varphi, S) = I(\varphi) + (S - 1) \cdot I(\varphi^0) = 0, \quad (3.1)$$

де φ^0 - вектор нульових початкових умов.

Продиференціюємо $H(\varphi, S)$ по φ :

$$H'(\varphi, S) = I'(\varphi).$$

Отже, ітераційна формула для кожного S_i матиме вигляд

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k - [I'(\varphi_k)]^{-1} \cdot H(\varphi_k, S_i)$$

або

$$\Gamma(\varphi_k) \cdot \Delta\varphi_k = -H(\varphi_k, S_i).$$

Остаточно отримаємо наступне рівняння:

$$\Gamma(\varphi_k) \cdot \Delta\varphi_k = -[I(\varphi_k) + (S_i - 1) \cdot I(\varphi^0)]. \quad (3.2)$$

Реалізація цього методу у системі діагностування здійснюється за наступним алгоритмом.

Крок 1. Завдання початкових умов $\varphi^0 = 0$, $S = 0$, $\Delta S = 0.05$, $\varepsilon_{\text{доп}} = 10^{-5}$.

Крок 2. Обчислення $S = S + \Delta S$, $\varphi = \varphi^0$, $N = 0$, $I^0 = I(0)$.

Крок 3. Формування матриці диференціальних провідностей та вектора вузлових струмів.

Крок 4. Обчислення правої частини системи (3.2).

Крок 5. Розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь методом LU-розкладання.

Крок 6. Обчислення $\varphi = \varphi + \Delta\varphi$; $N = N + 1$.

Крок 7. Обчислення норми вектора прирощення ε .

Крок 8. Якщо $\varepsilon < \varepsilon_{\text{доп}}$, то перехід до кроку 11.

Крок 9. Якщо $N > 5$, то $S = S - \Delta S$, $\Delta S = \Delta S/2$, перехід до кроку 2.

Крок 10. Якщо $N < 5$, то перехід до кроку 3.

Крок 11. Обчислення $\varphi^0 = \varphi$, якщо $N < 4$, то $\Delta S = 2 \cdot \Delta S$ та якщо $S + \Delta S > 1$, то $\Delta S = 1 - S$.

Крок 12. Якщо $\Delta S \neq 0$, то перехід до кроку 2.

Крок 13. Рішення одержано.

Для розрахунку функцій параметричної чутливості вихідних характеристик системи, що необхідні для обчислення вектора градієнта цільової функції, використовується метод прирощень [52].

Вектор градієнт цільової функції має вигляд:

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \nabla f(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial q_1} \\ \frac{\partial f}{\partial q_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial q_n} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

де n - кількість параметрів \mathbf{q} , а $\frac{\partial f}{\partial q_1}, \frac{\partial f}{\partial q_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial q_n}$ - часті похідні цільової функції за кожним параметром, тобто абсолютні функції параметричної чутливості.

Функція параметричної чутливості вихідної характеристики $Y(\mathbf{q})$ до зміни n -го параметра q_n :

$$A_{q_n}^Y = \lim_{\Delta q_n \rightarrow 0} \frac{\Delta Y(\mathbf{q})}{\Delta q_n}.$$

Тому, що в процесі оптимізації проводиться багаторазовий розрахунок значень вихідних характеристик $Y(\mathbf{q})$ при зміні значень внутрішніх параметрів системи та при цьому збільшення значень параметрів Δq_n величини досить малі, доцільним є розрахунок функцій параметричної чутливості методом прирощень за формулою:

$$A_{q_n}^Y = \frac{Y(q_n + \Delta q_n) - Y(q_n)}{\Delta q_n}, \quad (3.4)$$

де $Y(q_n)$ та $Y(q_n + \Delta q_n)$ - відповідно значення цільової функції при старому та новому значенні q_n -го параметра, Δq_n - прирощення n -го параметра.

Застосування цього метода дозволяє істотно скоротити кількість і час розрахунків функцій параметричної чутливості в порівнянні з іншими відомими методами (диференціювання, сполученої моделі та інших).

Для розрахунку значень параметрів, що діагностуються, із застосуванням оптимізації використовується метод Давидона-Флетчера-Пауелла [53,54]. Це квазіньютонівський метод, який має переваги методу Ньютона (висока швидкість збіжності) та водночас не вимагає обчислень функцій чутливостей другого порядку та обертання матриці Гессе на кожному кроку оптимізації, і сходиться будь-якого початкового наближення. Він заснований на формулі

$$\mathbf{q}_{i+1} = \mathbf{q}_i - \lambda_i \cdot \mathbf{G}^{-1}(\mathbf{q}_i) \cdot \mathbf{g}(\mathbf{q}_i),$$

в якій $\mathbf{G}^{-1}(\mathbf{q}_i)$ замінюється матрицею $\mathbf{H}(\mathbf{q}_i)$, що оновлюється на кожному кроці і в ліміті стає рівною зворотному гесіану $\mathbf{G}^{-1}(\mathbf{q}_i)$.

Метод Давидона-Флетчера-Пауелла докладно розглянуто у розділі 2.

Розроблена система діагностування, на прикладі радіоелектронної системи, дозволяє проводити:

- розрахунок вихідних характеристик у статичному режимі, часовій та частотній областях;
- розрахунок функцій чутливості реакцій схеми на тестові дії до зміни внутрішніх параметрів системи;
- вибір ефективних тестових вхідних впливів та вихідних характеристик системи, необхідних для забезпечення її діагностовності;
- розрахунок дійсних значень параметрів та режимів роботи елементів, що комплектують систему, за вимірними вихідними характеристиками системи;
- автоматизоване діагностування системи, шляхом класифікації її технічного стану за ознакою потрапляння або не потрапляння значень параметрів та режимів роботи елементів у межі, встановлені межами зон допусків на них.

Перераховані види розрахунків можуть бути виконані комп'ютерною системою діагностування на прикладі радіоелектронної системи, що містить такі

елементи: резистори, конденсатори, котушки індуктивності, діоди, стабілітрони, біополярні та польові транзистори та операційні підсилювачі через їх математичні моделі невеликої складності.

Витрати комп'ютерного часу під час роботи системи діагностування визначаються швидкодією комп'ютера, видом виконуваного системою розрахунку і розмірністю завдання, та може становити від кількох секунд до кількох годин.

3.5 Висновки за розділом 3

1. На основі аналізу вимог, що висуваються до комп'ютерної системи діагностування внутрішніх параметрів технічних систем розроблено структурну схему та алгоритм функціонування системи.

2. Викладено функціональний зміст блоків структурної схеми системи та особливості її функціонування.

3. Розроблено алгоритм функціонування програмних модулів системи.

4. Виконано програмну реалізацію системи відповідно до принципів структурного програмування та комплексування програмного забезпечення.

5. Проведено аналіз та вибір чисельного методу вирішення систем нелінійних рівнянь, методу обчислення функцій параметричної чутливості та методу оптимізації, що підвищили ефективність та алгоритмічну надійність програмного забезпечення.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

З метою перевірки та підтвердження можливого практичного застосування розроблених методу, моделі, алгоритмів та програмних засобів були проведені експериментальні дослідження на прикладі двох нескладних радіоелектронних схем в якості прикладів діагностованих технічних систем.

4.1 Експериментальна перевірка на прикладі пасивного фільтра

В якості найпростішого тестового прикладу для перевірки розроблених у роботі моделі, методу та алгоритму діагностування було взято пасивний RC-фільтр нижніх частот. Його принципова електрична схема наведена на рисунку 4.1.

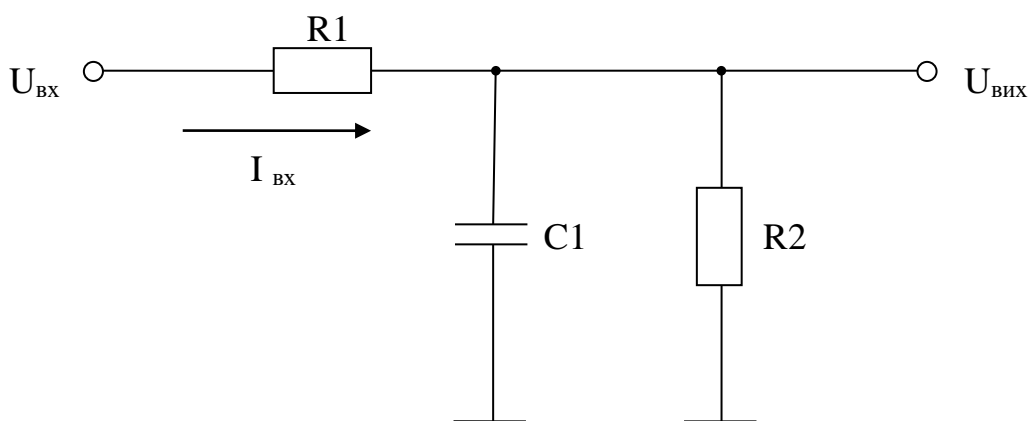


Рисунок 4.1 - Принципова електрична схема фільтра

Внутрішніми параметрами цього фільтра є опори резисторів R1, R2 та ємність конденсатора C1. Їхні номінальні значення та допуски на них наступні:

$$C1 = 100 \text{ пФ} \pm 20\%, \quad R1 = 10 \text{ кОм} \pm 10\%, \quad R2 = 10 \text{ кОм} \pm 10\%.$$

Для забезпечення діагностовності необхідно вибрати вхідні впливи та вихідні характеристики достатні для однозначного визначення значень

внутрішніх параметрів фільтра. За допомогою розробленого в дипломній роботі програмного комплексу, згідно з викладеною в розділі 2 методикою, були обрані такі вхідні дії та вихідні характеристики.

Тестовими вхідними впливами є вхідні напруги $U_{вх}$ амплітудою 1 Вольт із частотами 1Гц, 100Гц, 1кГц, 10кГц, 100кГц.

Вихідними характеристиками - частотні залежності модуля коефіцієнта передачі за напругою $K = U_{вих}/U_{вх}$ (амплітудно-частотна характеристика) та вхідного струму $I_{вх}$.

У процесі забезпечення діагностованості фільтра в якості його виміряних вихідних характеристик використовувалися характеристики, розраховані за допомогою програми аналізу електричних характеристик PE3 PSpice за різних призначених наборів значень параметрів як у межах допусків на них, так і за їх межами.

Отримані в результаті значення внутрішніх електричних параметрів фільтра та значення цих же параметрів, заданих при моделюванні експерименту, наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Значення діагностуємих параметрів

Параметр	Номинальні			В допусках			Вихід за допуск		
	Задан	Розр	Похиб%	Задан	Розр	Похиб%	Задан	Розр	Похиб%
R1,кОм	10	9.999	0.01	9	8.999	0.011	15	14.999	0.007
R2,кОм	10	9.999	0.01	11	10.999	0.009	10	9.999	0.01
C1,пФ	100	99.998	0.002	90	89.999	0.001	10	9.996	0.04

Після етапу забезпечення діагностовності були зібрані макети фільтра, при цьому перед встановленням елементів були попередньо виміряні дійсні значення їх параметрів. При цьому в одному макеті були встановлені елементи з номінальними значеннями параметрів, що відповідають переліку елементів, а в іншому макеті замість деяких елементів були встановлені елементи з іншими номінальними значеннями, що моделюють дефект у вигляді виходу значення

параметра за допуск. Потім на макети подавалися вхідні впливи та вимірювалися вихідні характеристики, вибрані на етапі забезпечення діагностовності фільтра. Схема вимірів зображено на рисунку 4.2, де ГС - генератор сигналів ГЗ-118; V1...V3 - цифрові вольтметри В7-16; Rс - резистор у вхідному колі, необхідний для непрямого вимірювання вхідного струму.

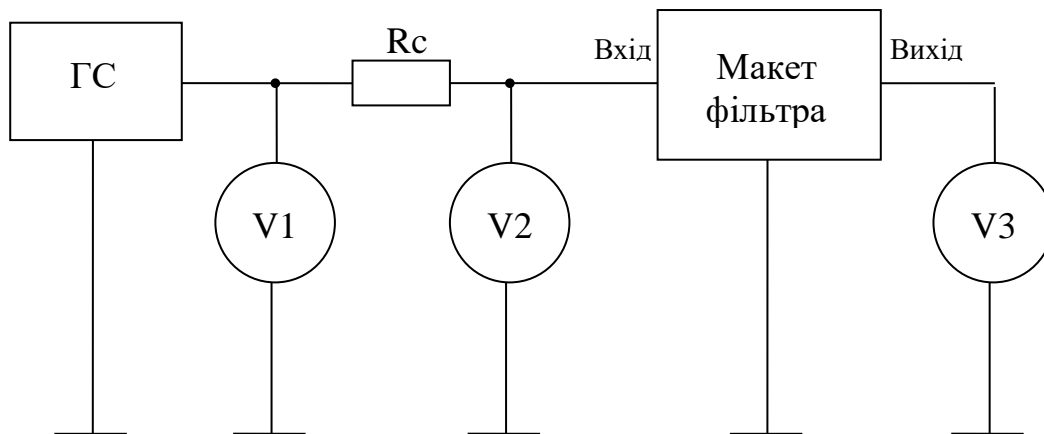


Рисунок 4.2 - Схема вимірювання вихідних характеристик фільтра

Порядок проведення вимірів:

- 1) Зібрати схему вимірів (рис.4.2);
- 2) Відкалібрувати прилади;
- 3) Від джерела сигналу подати напругу з частотою 1Гц і такою амплітудою, щоб на вольтметрі V2 амплітудне значення напруги дорівнювало 1 Вольт (вольтметр в режимі вимірювання змінної напруги);
- 4) Зняти покази з вольтметрів V1, V2 та V3 (всі вольтметри в режимі вимірювання змінної напруги);
- 5) Повторити пп 3-4) для наступних значень частоти вхідної напруги: 100Гц, 1кГц, 10кГц, 100кГц при цьому амплітуду вхідної напруги підтримувати незмінною (контролювати вольтметром V2);
- 6) Перерахувати діючі значення напруги, що показуються вольтметрами в амплітудні $V \rightarrow U$;
- 7) Перерахувати та побудувати частотні характеристики:

$$K_u(f) = U_3/U_2 \text{ та } I_{\text{вх}}(f) = (U_1-U_2) / R_c,$$

где K_u - коефіцієнт передачі за напругою, $I_{\text{вх}}$ - вхідний струм.

Потім, за допомогою розробленої в дипломній роботі комп'ютерної системи діагностування, згідно з викладеною в розділі 2 методикою, за вимірними значеннями вихідних характеристик фільтра було проведено діагностування внутрішніх електричних параметрів, тобто визначено їх дійсні значення та за результатами порівняння їх із гранично-допустимими значеннями було виявлено несправний макет фільтра та дефектні елементи. Отримані в результаті розрахунку значення параметрів, їх вимірні та гранично-допустимі значення наведені в таблиці 4.2, а вимірні та розрахункові вихідні характеристики фільтра наведено у Додатку А на рисунках А.1-А.4.

Таблиця 4.2 – Значення діагностуємих параметрів

Параметр	Гранич. доп. значення		Макет 1 (справний)			Макет 2 (несправний)		
	Нижнє	Верхнє	Задан	Розр	Похиб%	Задан	Розр	Похиб%
R1,кОм	9	11	10.22	10.48	2.5	20.32	20.71	1.9
R2,кОм	9	11	10.13	9.93	1.9	10.47	10.25	2.1
C1,пФ	80	120	100.5	102.8	2.3	102.3	104.9	2.5

Як видно з таблиці 4.2, максимальна похибка визначення значень параметрів становила 2.5 відсотка. Істотне збільшення похибки визначення дійсних значень параметрів порівняно з похибками, наведеними у таблиці 4.1, пояснюється похибкою вимірювань вихідних характеристик фільтра [55,56]. Підвищення точності діагностування електричних параметрів фільтра та відповідно режимів роботи елементів можна досягти зменшенням похибки вимірювань.

4.2 Експериментальна перевірка на прикладі підсилювача проміжної частоти

В якості наступного тестового прикладу для перевірки розроблених у дипломній роботі моделі, методу та алгоритму діагностування було розглянуто радіоелектронний функціональний вузол, що є однокаскадним підсилювачем проміжної частоти (ППЧ) [57], принципова електрична схема якого наведена на рисунку 4.3.

Цей підсилювач використовується у зв'язковому радіоприймачі у тракті сигналу з амплітудною модуляцією (АМ). Він призначений для посилення сигналу, що надходить від перетворювача частоти (ПрЧ) до рівня, необхідного для нормальної роботи демодулятора (ДМ).

Тракт проміжної частоти виконаний із зосередженою селективністю, тому на вході ППЧ застосовуються фільтри зосередженої селекції (ФЗС), а смуга пропускання ППЧ у кілька разів перевищує смугу пропускання ФЗС. Ступінчасте регулювання смуги пропускання тракту проміжної частоти здійснюється перемиканням ФЗС з різними смугами пропускання.

Основні якісні показники ППЧ, що нормуються в технічному завданні (ТЗ) та розраховані на етапі його проектування за допомогою підсистеми аналізу та забезпечення електричних характеристик PSpice наступні:

- коефіцієнт посилення по напрузі K_u - 50;
- нижня гранична частота смуги пропускання f_n - 5 кГц;
- верхня гранична частота смуги пропускання f_v - 10 МГц;
- нерівномірність амплітудно-частотної характеристики у смугі пропускання δK_u - 3 дВ;
- напруга живлення - +5 В;
- номінальна вхідна напруга - 10 мВ;
- опір навантаження - 10 кОм;
- струм споживання I_c - 1.7 мА.

Перелік елементів, що комплектують ППЧ, наведено у таблиці 4.3.

Згідно з розробленим у дипломній роботі методом діагностування параметрів та режимів роботи елементів (розділ 2), необхідно ще на етапі проектування ППЧ забезпечити його діагностовність.

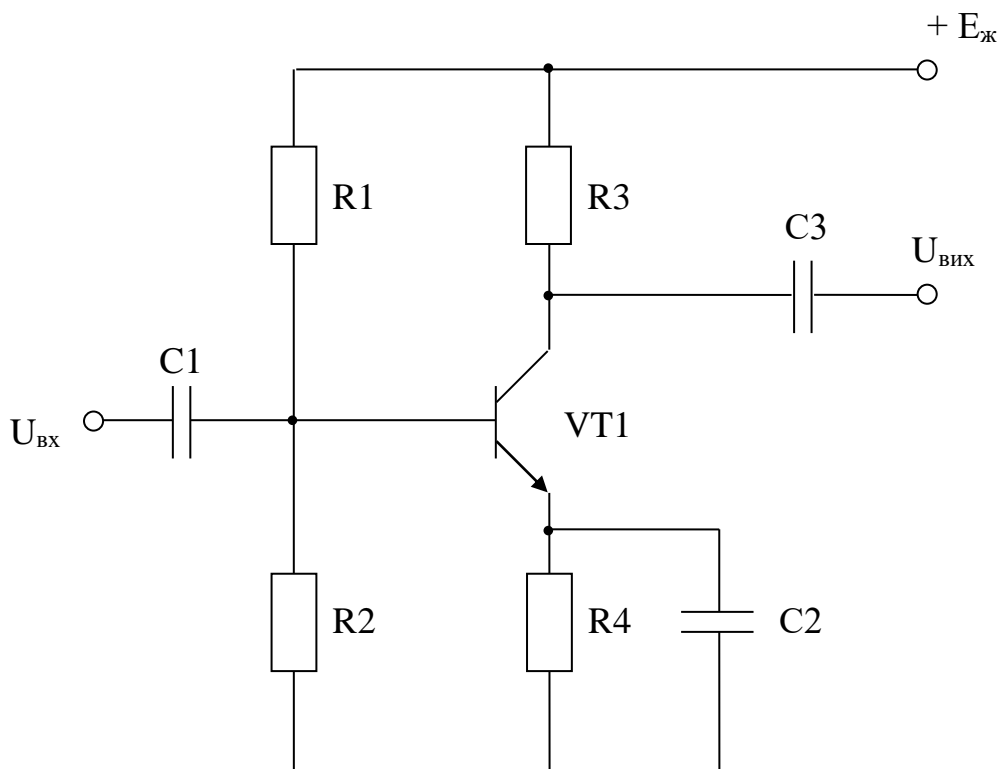


Рисунок 4.3 - Принципова електрична схема підсилювача

Таблиця 4.3 – Перелік елементів підсилювача

Поз. поз-начення	Найменування	Кіл.	Примітка
<u>Конденсатори</u>			
C1, C3	К10-7В 10 мкФ ± 20%	2	
C2	К10-7В 5 мкФ ± 20%	1	
<u>Резистори</u>			
R1	МЛТ – 0.125 – 43 кОм ± 10%	1	
R2	МЛТ – 0.125 – 27 кОм ± 10%	1	
R3	МЛТ – 0.125 – 1 кОм ± 10%	1	
R4	МЛТ – 0.125 – 510 Ом ± 10%	1	
VT1	Транзистор КТ315Г	1	

За допомогою графічного редактора системи аналізу та забезпечення електричних характеристик PSpice вводимо в комп'ютер принципову електричну схему ППЧ, з підключеним опором навантаження та джерелами живлення та сигналу.

При цьому значення всіх внутрішніх електричних параметрів задаємо рівними їх номінальним значенням (рис.4.4).

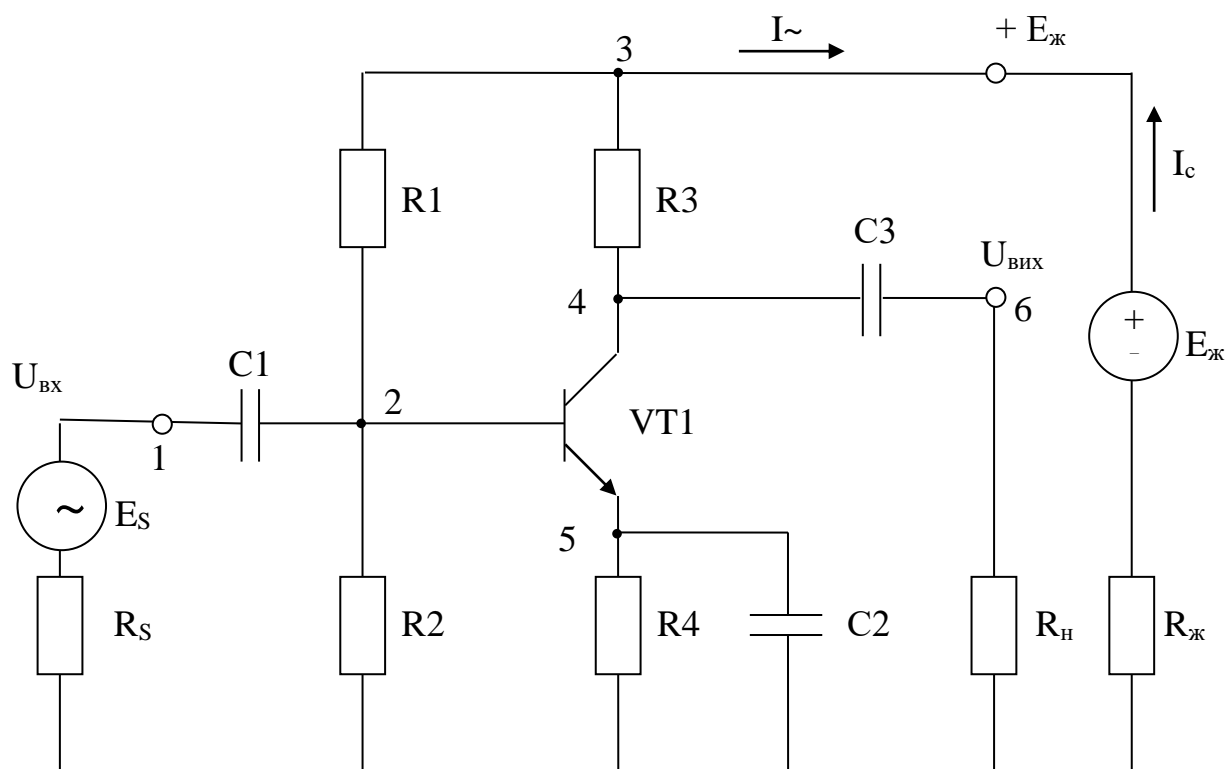


Рисунок 4.4 - Топологічна модель схеми (1-6 - номери вузлів)

Потім необхідно розрахувати вихідні характеристики ППЧ, що нормуються у ТЗ на проектування ППЧ. Ці характеристики нормуються наступними параметрами, значення яких наведені вище: K_u , f_n , f_v , δK_u , I_c .

Для отримання значень перших чотирьох параметрів необхідно обчислити амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) ППЧ, тобто провести розрахунок схеми в частотній області, а для отримання значення струму споживання I_c необхідно провести статичний розрахунок схеми (розрахунок постійного струму). Для цього як вхідні впливи необхідно задати амплітуду вхідного сигналу $U_{вх} = 10\text{мВ}$, діапазон частот вхідного сигналу з кроком по частоті і напругу живлення

+5В. Тут необхідно розрахувати відносні функції параметричної чутливості вихідних характеристик до зміни значень всіх внутрішніх електричних параметрів ППЧ S^{Y_q} . Розраховані вихідні характеристики ППЧ та функції параметричної чутливості наведено у Додатку Б дипломної роботи.

З метою зменшення розмірності задачі за розрахованими значеннями S^{Y_q} згідно з наведеними в методиці рекомендаціями з множини параметрів були відібрані найбільш значущі, тобто ті, що найбільше впливають на вихідні характеристики ППЧ, його внутрішні електричні параметри:

- R1, R2, R3, R4 – опори відповідних резисторів;
- C1, C2, C3 – ємності відповідних конденсаторів;
- Параметри моделі біполярного транзистора [58]:
- RB - об'ємний опір бази,
- IS - струм насичення,
- BF - максимальний коефіцієнт посилення струму у схемі з ОЕ у нормальному режимі,
- ISE - зворотний струм емітерного переходу,
- NE – коефіцієнт неідеальності емітерного переходу,
- CJC - ємність колекторного переходу при нульовому зміщенні,
- CJE – ємність емітерного переходу при нульовому зміщенні.

Ці параметри приймаються в якості діагностуємих, інші параметри (незначущі) вважаються постійними та їх значення рівними номінальним.

Вибрані параметри, що діагностуються, були виділені у схемі.

Потім було проведено моделювання експерименту: були задані вхідні впливи: $U_{vx}=10\text{мВ}$, з дискретами за частотою, відповідним характерним точкам номінальної АЧХ ($f_n^{0.7}$, $f_v^{0.7}$, $f_n^{0.1}$, $f_v^{0.1}$, $f_n^{0.5}$, $f_v^{0.5}$, $f_{K_{\text{max}}}$) і напруга живлення + 5В, та розраховані відповідні точки АЧХ та струм споживання I_c . При цьому всі значення параметрів номінальні.

Після цього в програмі були задані такі ж вхідні впливи як у попередньому блоці, а в якості вимірних вихідних характеристик були введені розраховані вище значення відліків АЧХ і струм I_c .

Потім були задані обмеження на параметри, що діагностуються, рівні технологічним допускам на них і критерій зупинки процесу оптимізації $Eps=1e-5$.

Після цього програму діагностування було запущено на розрахунок. Розраховані значення параметрів представлені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати розрахунку 1.1

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	RB	IS	BF	ISE	NE	CJC	CJE
Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	$10^{15}A$		$10^{15}A$		пФ	пФ
46562	27223	995	510	9.2	5	9.9	3	24.6	270	25.5	1.23	7	11

Далі було змінено положення початкової точки процесу оптимізації. Це було зроблено так, щоб початкові значення всіх параметрів, що діагностуються, були рівними їх нижнім граничним значенням. Для цього необхідно задати $q'_0 = 0$ (см. формулу 2.8). Потім параметри, що діагностуються, були розраховані знову. Їх значення у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати розрахунку 1.2

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	RB	IS	BF	ISE	NE	CJC	CJE
Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	$10^{15}A$		$10^{15}A$		пФ	пФ
38700	28834	1008	508	11	5	11	3	21.3	323	24.2	1.18	6.9	11

Потім положення початкової точки оптимізації було змінено так, щоб початкові значення всіх параметрів, що діагностуються, були рівними їх верхнім граничним значенням.

Для цього необхідно задати $q'_0 = \pi/2=1.57$. Розрахунок значень параметрів був повторений ще раз та отримані наступні значення (таблиця 4.6).

Таблиця 4.6 – Результати розрахунку 1.3

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	RB	IS	BF	ISE	NE	CJC	CJE
Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	10^{15} А		10^{15} А		пФ	пФ
47295	25335	994	511	9.3	4.9	9.6	3	26.05	270	21.7	1.25	7	9.7

За результатами розрахунків було прийнято рішення $I=1$ щодо необхідності вибору додаткових вихідних характеристик для забезпечення діагностування ППЧ, згідно з запропонованими у методиці рекомендаціями.

Найбільш доступними (зовнішніми) вузлами ППЧ є вузол подачі вхідного сигналу, вузол підключення опору навантаження та вузол подачі напруги живлення. Розглянемо які додаткові вихідні характеристики ППЧ можна зняти з цих вузлів у функціональному режимі роботи підсилювача.

Постійні напруги та струми на вході та виході підсилювача вимірювати немає сенсу, т.к. вони дорівнюють нулю через конденсатори $C1$ і $C3$, що забезпечують розв'язку по постійному струму. Постійна напруга на вузлі, підключеному до джерела живлення визначається самим джерелом живлення, а постійний струм від джерела живлення, це є струм споживання I_c вже включений в цільову функцію.

Змінна напруга на виході ППЧ (на опорі навантаження) вже включена до цільової функції, т.к. вимірюється при визначенні коефіцієнта передачі ППЧ по напрузі. Змінний струм на виході підсилювача немає сенсу вимірювати тому, що опір навантаження постійна та відома величина. Вхідна змінна напруга задається джерелом сигналу.

Таким чином, як додаткові вихідні характеристики у функціональному режимі роботи ППЧ можна виміряти тільки частотну залежність вхідного струму від джерела сигналу $I_{вх}$ та частотну залежність змінного струму в колі джерела живлення I_{\sim} .

Тому крім уже розрахованих раніше АЧХ та струму споживання I_c при вхідних впливах: $U_{вх}=10$ мВ, з дискретами за частотою, що відповідає характерним точкам номінальної АЧХ ($f_H^{0.7}$, $f_B^{0.7}$, $f_H^{0.1}$, $f_B^{0.1}$, $f_H^{0.5}$, $f_B^{0.5}$, f_{Kumax}) та

напрузі живлення + 5В були розраховані додаткові вихідні частотні характеристики $I_{вх}$ та I_{\sim} . При цьому, як і раніше, всі значення параметрів були номінальними.

Після цього в програмі знову були задані такі ж вхідні впливи, як у попередньому блоці, а в якості вимірних вихідних характеристик були введені розраховані вище значення відліків АЧХ, частотних залежностей вхідного струму $I_{вх}$, струму в колі джерела живлення I_{\sim} та струм споживання I_c .

Потім знову був повторений розрахунок значень параметрів, що діагностуються починаючи оптимізацію з трьох початкових точок, як це було описано вище.

Розраховані значення параметрів наступні (табл.4.6 – 4.8).

Таблиця 4.6 – Результати розрахунку 2.1

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	RB	IS	BF	ISE	NE	CJC	CJE
Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	10^{15} А		10^{15} А		пФ	пФ
43274	27155	999	510	9.9	5	10	3	23.68	303	23.68	1.21	6.9	10

Таблиця 4.7 – Результати розрахунку 2.2

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	RB	IS	BF	ISE	NE	CJC	CJE
Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	10^{15} А		10^{15} А		пФ	пФ
43416	26995	999	510	9.9	5	10	3	23.68	303	23.68	1.20	7	10

Таблиця 4.8 – Результати розрахунку 2.3

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	RB	IS	BF	ISE	NE	CJC	CJE
Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	10^{15} А		10^{15} А		пФ	пФ
43169	27211	1	510	9.9	5	10	3	23.68	303	23.68	1.21	7	9.9

За результатами розрахунків було прийнято рішення $I=3$ про достатність обраних вихідних характеристик для забезпечення діагностування ППЧ в області

можливих значень параметрів, що діагностуються, обмеженої технологічними допусками на них.

Область діагностування, обмежена технологічними допусками на діагностовані параметри достатня для визначення дійсних значень параметрів, які знаходяться у межах допусків, тобто за відсутності дефектів. Тому для виявлення дефектів у вигляді виходу дійсних значень параметрів за межі допусків необхідно розширювати область діагностованості.

Обмеження на параметри, що діагностуються, були розсунуті на величину двох технологічних допусків і задані в програмі.

Розрахунок значень параметрів, що діагностуються, був повторений з трьох різних початкових точок. Розраховані значення параметрів наведені у табл.4.9 – 4.11.

Таблиця 4.9 – Результати розрахунку 3.1

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	RB	IS	BF	ISE	NE	CJC	CJE
Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	10 ¹⁵ А		10 ¹⁵ А		пФ	пФ
42939	26998	1000	510	9.9	5	10	3	23.68	298	23.68	1.21	7	10

Таблиця 4.10 – Результати розрахунку 3.2

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	RB	IS	BF	ISE	NE	CJC	CJE
Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	10 ¹⁵ А		10 ¹⁵ А		пФ	пФ
43446	29625	999	509	9.6	5	10	3	23.68	303	23.68	1.20	6.9	10.3

Таблиця 4.11 – Результати розрахунку 3.3

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	RB	IS	BF	ISE	NE	CJC	CJE
Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	10 ¹⁵ А		10 ¹⁵ А		пФ	пФ
43123	25215	1000	510	10.3	5	10	3	23.68	297	23.68	1.21	7	9

За результатами розрахунків було прийнято рішення $I=2$ про недостатність точності діагностованості ППЧ в області можливих значень параметрів, що діагностуються, обмеженою двома технологічними допусками на них.

Тому було зменшено параметр оптимізації $Eps=1e-6$ і повторено попередній розрахунок. Результати розрахунку наступні (табл.4.12 – 4.14).

Таблиця 4.12 – Результати розрахунку 4.1

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	RB	IS	BF	ISE	NE	CJC	CJE
Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	$10^{15}A$		$10^{15}A$		пФ	пФ
43053	26988	1000	510	10	5	10	3	23.68	298	23.68	1.21	7	10

Таблиця 4.13 – Результати розрахунку 4.2

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	RB	IS	BF	ISE	NE	CJC	CJE
Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	$10^{15}A$		$10^{15}A$		пФ	пФ
42939	27112	1000	510	10	5	10	3	23.68	297	23.68	1.21	7	10

Таблиця 4.14 – Результати розрахунку 4.3

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	RB	IS	BF	ISE	NE	CJC	CJE
Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	$10^{15}A$		$10^{15}A$		пФ	пФ
43007	26976	1000	510	10	5	10	3	23.68	303	23.68	1.21	7	10

За результатами розрахунків було прийнято рішення $I=3$ про достатність обраних вихідних характеристик для забезпечення діагностованості ППЧ в області можливих значень параметрів, що діагностуються, обмеженої двома технологічними допусками на них.

Таким чином, діагностовність ППЧ у зазначеному вище діапазоні можливих значень параметрів забезпечують вхідні дії:

- напруга живлення +5В,

- напруга джерела гармонічного сигналу амплітудою 10мВ з частотами 1Гц, 10Гц, 100Гц, 1КГц, 10КГц, 100КГц, 1МГц, 10МГц;
- вихідні характеристики ППЧ:
- струм споживання,
- частотні залежності модуля коефіцієнта посилення за напругою K_u ,
- вхідного струму від джерела сигналу $I_{вх}$,
- змінного струму в колі джерела живлення I_{\sim} ;
- параметр оптимізації $Eps=1e-6$.

Після цього було проведено перевірку діагностування. За допомогою системи PSpice були промодельовані два випадки:

- 1) Усі параметри ППЧ, що діагностуються, лежать у межах допусків;
- 2) Три параметри, що діагностуються, виходять за межі допусків:
 - опір резистора R1,
 - ємність конденсатора C3,
 - ємність колекторного переходу CJC транзистора VT1.

Для цих випадків було розраховано, обрані вище вихідні характеристики ППЧ, тобто проведено моделювання експерименту.

Розраховані характеристики наведено у Додатку Б.

Потім було проведено діагностування, де в якості виміряних вихідних характеристик були введені характеристики, отримані вище при моделюванні експерименту.

За допомогою графічного редактора програмного комплексу PSpice було введено принципову електричну схему ППЧ, з підключеними опором навантаження та джерелами живлення і сигналу. Значення всіх внутрішніх електричних параметрів дорівнюють їх номінальним значенням.

У введеній схемі були виділені параметри, що діагностуються, задані вхідні впливи, введені отримані при моделюванні експерименту вихідні характеристики і задані обмеження на діагностовані параметри рівні подвійним технологічним допускам та параметр оптимізації $Eps=1e-6$. Після цього було запущено програму діагностування. Виведені на екран виміряні та розрахункові

вихідні характеристики збіглися, тому точність була визнана достатньою. Потім було проведено порівняння розрахованих значень параметрів, що діагностуються, і режимів роботи елементів з їх допустимими значеннями, за результатами якого перший ППЧ був визнаний справним, а другий несправним – дефектні елементи R1, C1 та VT1(CJC) були виявлені та видані рекомендації щодо їх заміни. Розраховані значення параметрів, що діагностуються, їх задані значення при моделюванні експерименту та похибки їх визначення наведені в Додатку Б у таблиці Б.1. При цьому похибка визначення параметрів, що діагностуються, не перевищила 1%.

Після цього було проведено діагностування електричних параметрів та режимів роботи елементів двох зібраних макетів досліджуваного ППЧ.

Для цього було зібрано два макети підсилювача, причому перед встановленням елементів були попередньо виміряні дійсні значення їх параметрів. Дійсні значення параметрів моделі транзистора були отримані за допомогою програми ідентифікації параметрів моделі транзистора за його виміряними вольт-амперним і вольт-фарадним характеристиками, що входить до складу системи PSpice.

При цьому в одному макеті були встановлені елементи з номінальними значеннями параметрів, що відповідають переліку елементів, а в іншому макеті замість деяких елементів були встановлені елементи з іншими номінальними значеннями (R3 та C1), що моделюють дефект у вигляді виходу значення параметра за допуск. Потім на макети подавалися вхідні впливи та вимірювалися вихідні характеристики, вибрані на етапі забезпечення діагностовності підсилювача. Схема вимірювань зображена на рисунку 4.5, де ГС – генератор сигналів ГЗ-118; ДЖ – джерело живлення Б5-46; V1...V5 – цифрові вольтметри В7-16; R_c - резистор у вхідному колі, необхідний для непрямого вимірювання вхідного струму; R_ж - резистор в ланцюзі живлення, необхідний для непрямого вимірювання струму в колі живлення; R_н - навантажувальний резистор.

Порядок проведення вимірювань наступний:

- 1) Зібрати схему вимірів;

- 2) Відкалібрувати прилади;
- 3) Подати від джерела живлення таку напругу, щоб вольтметр V3 показував +5 вольт, зафіксувати показ вольтметра V4 (вольтметри V3 і V4 в режимі вимірювання постійної напруги);
- 4) Розрахувати струм споживання $I_c = (V4 - V3) / R_c$;
- 5) Від джерела сигналу подати напругу з частотою 1Гц і такою амплітудою, щоб на вольтметрі V2 амплітудне значення напруги дорівнювало 10 мілівольт (вольтметр в режимі вимірювання змінної напруги);

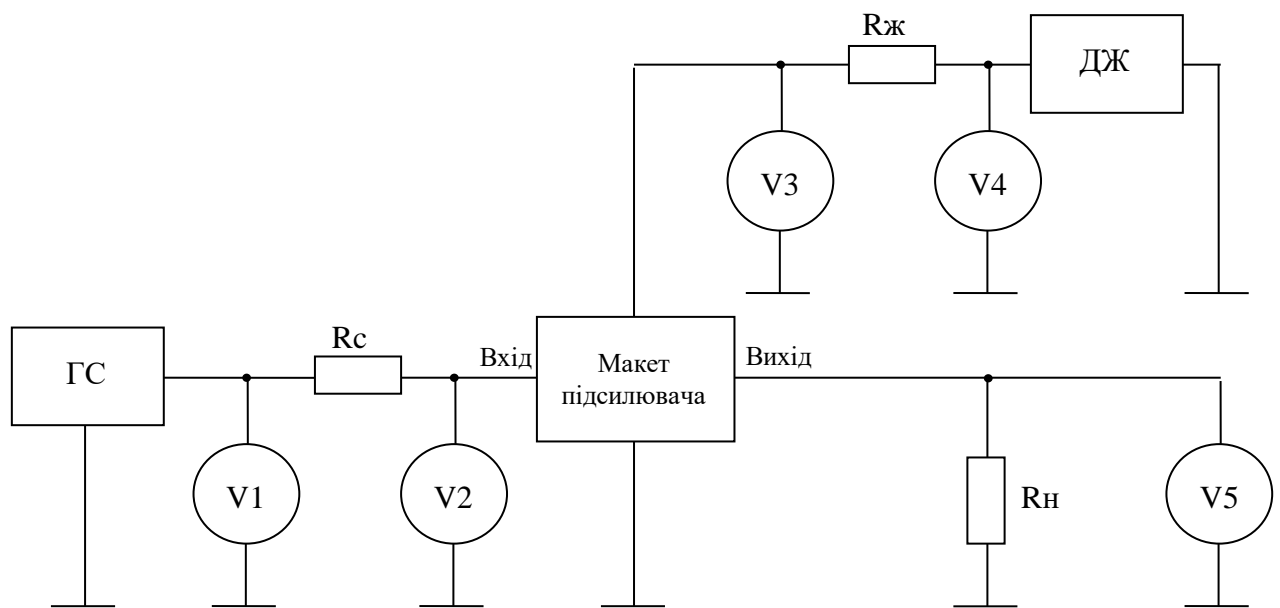


Рисунок 4.5 - Схема вимірювання вихідних характеристик підсилювача

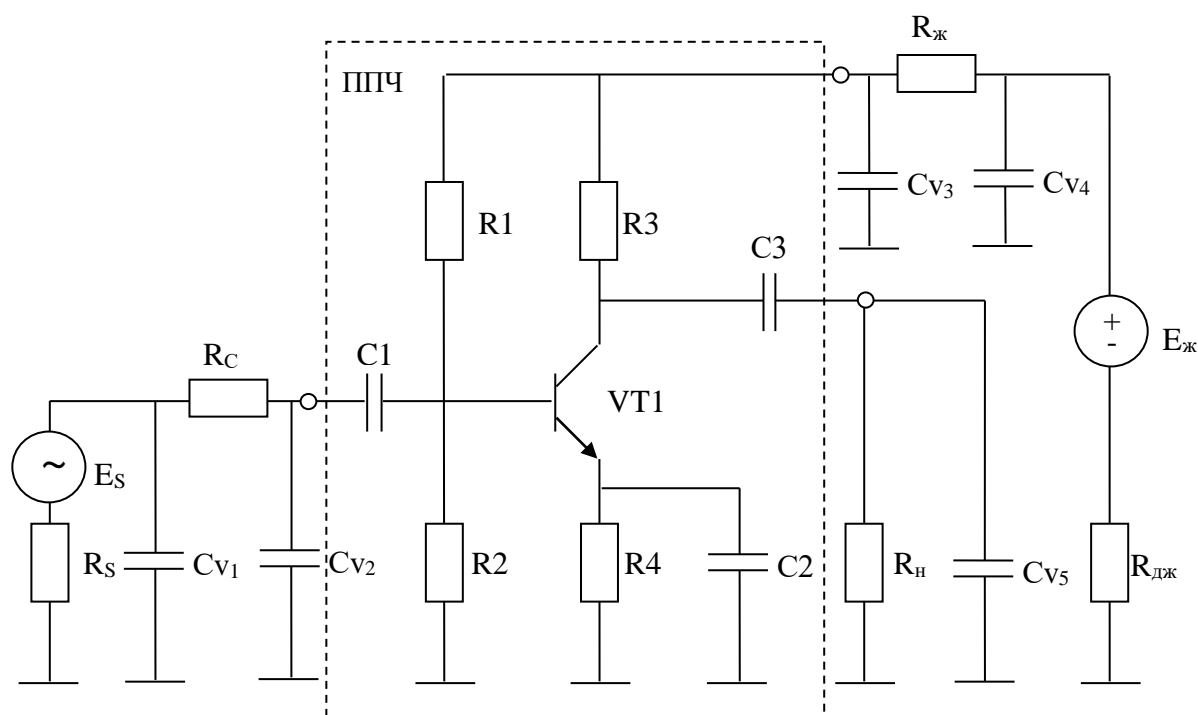
- 6) Зняти показання з вольтметрів V1, V2, V3, V4 та V5 (всі вольтметри в режимі вимірювання змінної напруги);
- 7) Повторити пп 4-5 для наступних значень частоти вхідної напруги: 100Гц, 1кГц, 5кГц, 10кГц, 100кГц, 1МГц, 5МГц, 10МГц, 20МГц, при цьому амплітуду вхідної напруги підтримувати постійною (контролювати вольтметром V2);
- 8) Перерахувати діючі (ефективні) значення напруги, що показуються вольтметрами в амплітудні $V_a = \sqrt{2}V_d$;
- 9) Перерахувати та побудувати частотні характеристики:

$$K_u(f) = V_5/V_2, I_{вх}(f) = (V_1-V_2) / R_c, I_{\sim}(f) = (V_3-V_4) / R_{ж},$$

де K_u - коефіцієнт посилення, $I_{вх}$ - вхідний ток, I_{\sim} - змінна складова струму в колі живлення.

Вимірні вихідні характеристики ППЧ наведено у Додатку Б на рисунках Б.5-Б.10.

За допомогою графічного редактора програмного комплексу PSpice було введено модель схеми вимірювань рис.4.5, що включає принципову електричну схему ППЧ, опір навантаження, джерела живлення та сигналу, а також вхідні ємності вольтметрів (рис.4.6). Значення всіх внутрішніх електричних параметрів дорівнюють їх номінальним значенням.



Рисунк 4.6 - Топологічна модель схеми вимірювань вихідних характеристик підсилювача

У введеній схемі були виділені параметри, що діагностуються, задані вхідні впливи, введені вимірні вихідні характеристики і задані обмеження на

діагностовані параметри рівні подвійним технологічним допускам, параметр оптимізації $Eps=1e-6$. Після цього було запущено програму діагностування. Відмінність виведених на екран вимірних та розрахункових вихідних характеристик не перевищила максимальної похибки вимірювань вольтметрів, тому точність була визнана достатньою. Потім було проведено порівняння розрахованих значень параметрів, що діагностуються, і режимів роботи елементів з їх допустимими значеннями, за результатами якого перший ППЧ був визнаний справним, а другий несправним - дефектні елементи (R3 та C1) були виявлені і видані рекомендації щодо їх заміни.

Розраховані значення параметрів, що діагностуються, їх вимірні перед встановленням у макет значення та похибки їх визначення наведені в Додатку Б у таблиці Б.2. При цьому похибка визначення параметрів, що діагностуються, не перевищила 5%.

Складовими похибки розрахунку дійсних значень параметрів елементів є похибки моделювання, обчислень на комп'ютері та вимірювання вихідних характеристик системи. Для зменшення похибки моделювання необхідно використовувати точніші моделі елементів, але при цьому зростає кількість параметрів і відповідно збільшується розмірність задачі діагностування.

Крім того, підвищення точності діагностування параметрів і відповідно режимів роботи елементів можна досягти зменшенням похибки вимірювання вихідних характеристик.

4.3 Висновки з розділу 4

Проведено експериментальні дослідження з оцінки точності розроблених методів, моделей, алгоритмів та програмного забезпечення, що підтверджують правомірність їх використання у практиці проектування та діагностування внутрішніх параметрів технічних систем.

ВИСНОВКИ

У процесі вирішення завдань, поставлених у дипломній роботі, отримано такі основні результати:

1. На основі проведеного аналізу предметної області показано необхідність контролю параметрів і режимів роботи комплектуючих елементів на основних етапах життєвого циклу технічних систем, як на етапі виготовлення, коли можливе виникнення виробничих дефектів, так і на етапі експлуатації, коли значення параметрів змінюються під дією часу та зовнішніх факторів.

2. Обґрунтовано можливість застосування оптимізаційного методу для визначення значень параметрів елементів та виявлення несправного елемента в межах даної технічної системи.

3. Відповідно до принципу системного підходу розроблено метод діагностування параметрів елементів у технічних системах, заснований на отриманні дійсних значень параметрів та режимів роботи елементів розрахунковим шляхом на основі експериментально отриманих вихідних характеристик системи із застосуванням методу оптимізації, що дозволило визначати дійсні значення як параметри всіх елементів у схемі, так і їх режимів роботи для порівняння з допустимими значеннями.

4. У рамках запропонованого методу діагностування розроблено діагностичну модель, яка відрізняється від відомих тим, що вона включає систему рівнянь, що є функціональною математичною моделлю системи (на прикладі радіоелектронної системи в базисі вузлових потенціалів), цільову функцію, в яку входять виміряні та розрахункові значення вихідних характеристик системи, обраних на етапі проектування системи з урахуванням забезпечення її діагностовності, та рівняння зв'язку вихідних характеристик з потенціалами у вузлах схеми. Це дозволяє звести завдання діагностування до мінімізації цільової функції. При цьому класифікація технічного стану системи

здійснюється за ознакою потрапляння або непотрапляння параметрів та режимів роботи елементів у межі, встановлені їх гранично допустимими значеннями.

5. Розроблено алгоритм забезпечення діагностовності системи на етапі її проектування, що відрізняється від відомих можливістю цілеспрямованої зміни вхідних тестових впливів та контрольних точок вимірювань вихідних характеристик системи, а при необхідності й змін конструкції для досягнення діагностованості системи.

6. Розроблено алгоритм діагностування параметрів елементів, які комплектують систему, що відрізняється послідовним аналізом вихідних характеристик системи та параметрів її математичної моделі, при цьому значення характеристик є вихідними даними для розрахунку параметрів.

7. Відповідно до принципів системного підходу та структурного програмування, а також з урахуванням принципів вкладеності, взаємозамінності та відкритості розроблено комп'ютерну систему діагностування, що відрізняється від відомих своєю структурою та складом. У структуру системи включені як вже розроблені та входять до складу існуючих САПР програмні модулі, так і нові модулі, що дозволяють розширити можливості системи щодо діагностування.

8. Виконано дослідження з перевірки розроблених методів, алгоритмів, програмних та методичних засобів діагностування елементів у технічних системах на прикладі простих радіоелектронних функціональних вузлів, та підтверджено правомірність їх застосування у практиці проектування та виробництва.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Технічна система - Вікіпедія [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0 - Заголовок з екрану.
2. Муромцев, Д.Ю. Управление качеством электронных средств : учебное пособие / Д.Ю. Муромцев, И.В. Тюрин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – Ч. 2. – 96 с.
3. Маслов А.Я., Чернышев А.А. и др. Оптимизация радиоэлектронной аппаратуры . Под ред. А.Я.Маслова, А.А.Чернышева,- М.: Радио и связь, 1982. – 200 с.
4. Горлов М.И., Данилин Н.С. Физические основы надежности интегральных схем. Учебное пособие. — М.: МАКС Пресс, 2008. — 404 с.
5. Дилон Б., Сингх И. Инженерные методы обеспечения надежности систем. Пер с англ. - М.: Мир, 1984. – 318 с.
6. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. – К.: 1994.
7. Биргер И.А. Техническая диагностика.- М.: Машиностроение, 1978.- 240 с.
8. Бородин, С.М. Основы технической диагностики электронных средств : учебное пособие / С. М. Бородин. – Ульяновск : УлГТУ, 2019. – 48 с.
9. Бородин, С. М. Обеспечение надежности при проектировании РЭС : учебное пособие / С. М. Бородин. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 106 с..
10. Байлов, В.В., Плаксиенко, В.С. Диагностика и обслуживание радиоэлектронных систем: Учебное пособие. –Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 64 с.

11. Федоров В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В.К.Федоров, Н.П.Сергеев, А.А.Кондрашин. - М.: Техносфера, 2005.-504 с.
12. Семенов Ю.Г. Контроль качества.- М.: Высшая школа, 1990,- 111с.
13. Ксенз С.П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств.- М.: Радио и связь, 1989.-248 с.
14. Лихтциндер Б.Я. Внутрисхемное диагностирование узлов радиоэлектронной аппаратуры.- К.: Техника, 1988.- 168 с.
15. Gao, Y., Yang, C. L., Tian, S. L., & Chen, F. (2014). Entropy based test point evaluation and selection method for analog circuit fault diagnosis. *Mathematical Problems in Engineering*. doi:10.1155/2014/259430.
16. И. В. Бойков, Н. П. Кривулин, Идентификация параметров нелинейных динамических систем, моделируемых полиномами Вольтерра, Сиб. журн. индустр. матем., 2018, том 21, номер 2, с. 17–31.
17. Saeks R., Sangiovanni-Vincentelli A., Visvanathan V. Diagnosability of nonlinear circuits and systems - Part II: Dinamical Systems.- *IEEE Trans. Circuits Syst.*, 1981.-vol.CAS-28, p.1103-1108.
18. Visvanathan V., Sangiovanni-Vincentelli A. Diagnosability of nonlinear circuits and systems - Part I: The dc case.- *IEEE Trans. Circuits Syst.*, 1981.- vol.CAS-28, p.1093-1102.
19. Дегтярев А.К., Саломатов Р.П. Способы и методы поиска неисправностей в радиоэлектронных системах // *Современные научные исследования и инновации*. 2022. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2022/03/97805>.
20. Б.В Цыпин, Ю.М. Крысин, А.Г. Схиртладзе, В.А. Скрыбин «Оптимизация поиска неисправностей при технической диагностике оборудования: Учебное пособие» Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002г.
21. Мерков, А.Б. Распознавание образов. Построение и обучение вероятностных моделей: учебное пособие / А.Б. Мерков. – М.: Едиториал, 2014. - 238 с.

22. Жадан, В.Г. Методы оптимизации. Численные алгоритмы: учебное пособие / В.Г. Жадан. – М.: МФТИ, 2015. – 320 с.
23. Грищенко Н.В., Семеріков С.О., Чернов Є.В., Хараджян О.А. Порівняльний аналіз методів апроксимації. - Кривий Ріг: КДПІ, 1998. – 25 с
24. Ройтмэн Л., Свами М. Метод диагностики цепейю ТИИЭР, 1981, т. 69, N 5, с.194-195.
25. Бэндлер Дж.У., Салама А.Э. Диагностика неисправностей в аналоговых цепях/ ТИИЭР: Пер. с англ.- 1985, т.73, N 8, с.35-87.
26. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10т. / Ред.совет: В.С.Авдудевский (пред.) и др. - М.: Машиностроение, 1987. - (В пер.). Т.9. Техническая диагностика / Под общ. ред. В.В.Клюева, П.П.Пархоменко. - 352 с.
27. Волков, Н.В. Разработка методов и средств для исследования динамики нелинейных автоматизированных машиностроительных систем на основе функциональных разложений Вольтерра-Винера с целью повышения достоверности контроля их эксплуатации/ Дисс. докт. техн. наук.- М.: МГТУ, 2001. - 170 с.
28. Konstantin Kasyan. Problems of technical states diagnosing of electronic devices. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics - Proceedings of the VI-th International Conference CADSM 2001, 12-17 February 2001, Lviv-Slavsko, Ukraine, p.127-128.
29. Касьян К. Проблеми діагностування технічного стану радіоелектронних пристроїв / Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. Вісник Національного університету "Львівська політехніка", № 415, 2001, с.189-194.
30. Kostiantyn Kasian, Mykola Kasian. Elementwise Diagnosing of Technical Systems with High Reliability Requirements. Proceedings of the XIII International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science TCSET’2016”, February 23– 26, 2016, Lviv-Slavsko, Ukraine, p.558-561.

31. Mykola Kasian, Kostiantyn Kasian. Diagnostic Mathematical Model of Radio-electronic Devices. Proceedings of 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, February 20 – 24, 2018, p.123-127.

32. Касьян Н.Н., Касьян К.Н. Обеспечение диагностируемости аналоговых устройств преобразования сигналов на этапе автоматизированного проектирования. Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий. / Материалы Международной конференции и Российской научной школы. Часть 2. – М.: Радио и связь, 2002, с. 186-187.

33. Касьян К.Н., Касьян Н.Н. Сквозное проектирование радиоэлектронных средств. Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий / Материалы Международной конференции и Российской научной школы. Часть 3. – М.: Радио и связь, 2004, с. 23-24.

34. Konstantin Kasyan, Nikolay Kasyan. Methodology of designing of radio-electronic means. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science - Proceedings of the International Conference TCSET 2004, 24-28 February 2004, Lviv-Slavsko, Ukraine, p.595-596.

35. Касьян М.М., Касьян К.М., Глушко В.І., Оніщенко В.Ф. Інформаційна технологія діагностування аналогових пристроїв перетворення сигналів. // Науковий журнал "Радіоелектроніка, інформатика, управління". - Запоріжжя: ЗНТУ.-2005.-№2(14) - с.28 - 33.

36. Konstantin Kasyan, Nikolay Kasyan. Diagnosing of Radio-Electronic Equipment With the Help of Traditional CAD Systems. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science - Proceedings of the International Conference TCSET 2006, February 28– March 4, 2006, Lviv-Slavsko, Ukraine, p.585-587.

37. Анисимов Б.В., Белов Б.И., Норенков И.П. Машинный расчет элементов ЭВМ.- М.: Высшая школа, 1976, - 336 с.

38. Байда Н.П. и др. Микропроцессорные системы поэлементного диагностирования РЭА / Н.П.Байда, И.В.Кузьмин, В.Т.Шпилевой.- М.: Радио и связь, 1987.- 256 с.: ил.

39. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования.: Учеб. пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 1984. - 248 с.:ил.

40. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. - М.: Радио и связь, 1988. - 256 с.:ил.

41. Касьян К.Н., Касьян Н.Н. Специализированная компьютерная система диагностирования радиоаппаратуры. Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий / Материалы Международной конференции и Российской научной школы. Часть 5. – М.: Радио и связь, 2003, с. 104.

42. Kasian K. Software Complex for Automated Diagnostics of Internal Parameters of Technical Systems / K. Kasian, M. Kasian [Electronic resource] // Proceedings of the Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019), Zaporizhzhia, Ukraine, April 15-19, 2019. – P. 498-509. – (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2353).

43. Касьян Н.Н., Касьян К.Н. Программная и информационная поддержка жизненного цикла радиоэлектронных средств. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції „Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій” РТІТ–2008, Запоріжжя, 24-26 вересня 2008 р. – Запоріжжя ЗНТУ.

44. Касьян К.Н., Касьян Н.Н. Программная и информационная поддержка диагностирования на этапе сопровождения радиоэлектронных средств// Східноєвропейський журнал передових технологій. - Харків: ПП “Технологічний центр”, Укр. держ. акад. залізнич. трансп. - №2/2 (68) 2014, с. 29-33.

46. Гради Буч. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения: 3-е издание.- М.: Вилямс, 2008. - 720 с.

47. Черников, Б.В. Оценка качества программного обеспечения: практикум / Б.В. Черников, Б.Е. Поклонов. - М.: Издательский дом «Форум», 2012. – 400 с.

48. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. Пер с англ.- М.: Радио и связь, 1988.- 560 с.

49. Дж. Дэннис мл., Р. Шабель. Численные методы безусловной оптимизации и решение систем нелинейных уравнений.: Пер.с англ. - М.: Мир, 1988. - 440 с.

50. Евсиков, Ю.А., Обрезков, Г.В., Разевиг, В.Д. и др. Прикладные математические методы анализа в радиотехнике/ Под ред. Г.В. Обрезкова.- М.: Высшая школа, 1985.- 343 с.

51. Системы автоматизированного проектирования: В 9-ти кн. Кн.5. Автоматизация функционального проектирования: Учебное пособие для вузов / П.К. Кузьмин, В.Б. Маничев; Под ред. И.П.Норенкова. - М.: Высшая школа, 1986.- 144 с.

52. Kasian M.M., Kasian K.M. Synthesis of current tolerances for the parameters of internal elements depending on the time and operating conditions of the computer system / Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій : Тези доповідей ІХ Міжнародної науково-практичної конференції (03–05 жовтня 2018 р., м. Запоріжжя) – Запоріжжя : ЗНТУ, 2018, - с.71-71.

53. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ.- М.: Радио и связь, 1988. - 128 с.

54. Гилл, Ф., Мюррей, У., Райт, М. Практическая оптимизация: Пер.с англ.- М.: Мир, 1985.- 509 с.

55. Калашников, Н.П., Аксенова, Е.Н. Методы оценки погрешностей при измерениях физических величин. Учебно-методическое пособие. – М.: Лань, 2019. – 40 с.

56. Минаев, А.М. Теория и практика анализа погрешностей / А.М. Минаев. – М.: Спутник+, 2013. – 694 с.

57. Касьян, К.Н., Касьян, Н.Н. Прогнозирование поведения внутренних параметров технических систем в процессе их диагностирования. Материалы XII международной научно-практической конференции „Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий” – М.: НИУ ВШЭ, 2015, - с.396-398.
58. Разевиг, В.Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice). - М.: СК Пресс, 1996.- 272 с.

ДОДАТОК А

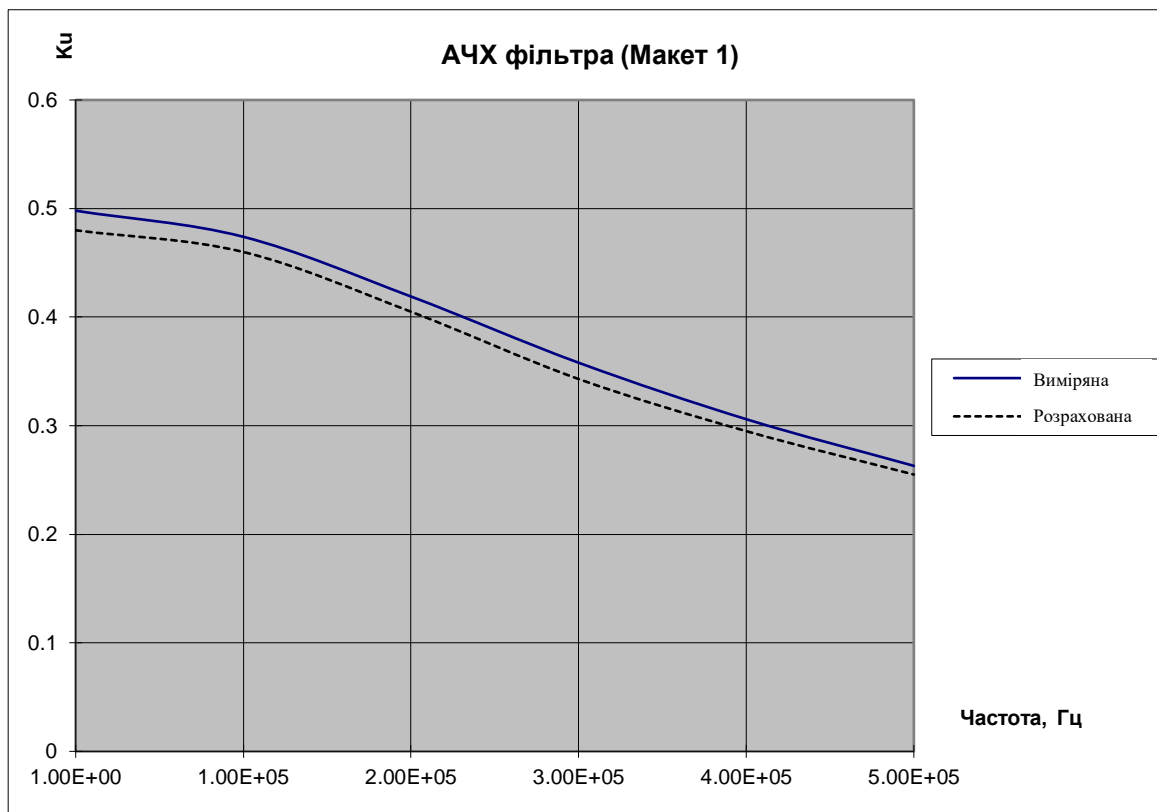


Рисунок А.1 - Амплітудно-частотна характеристика фільтра (Макет 1)

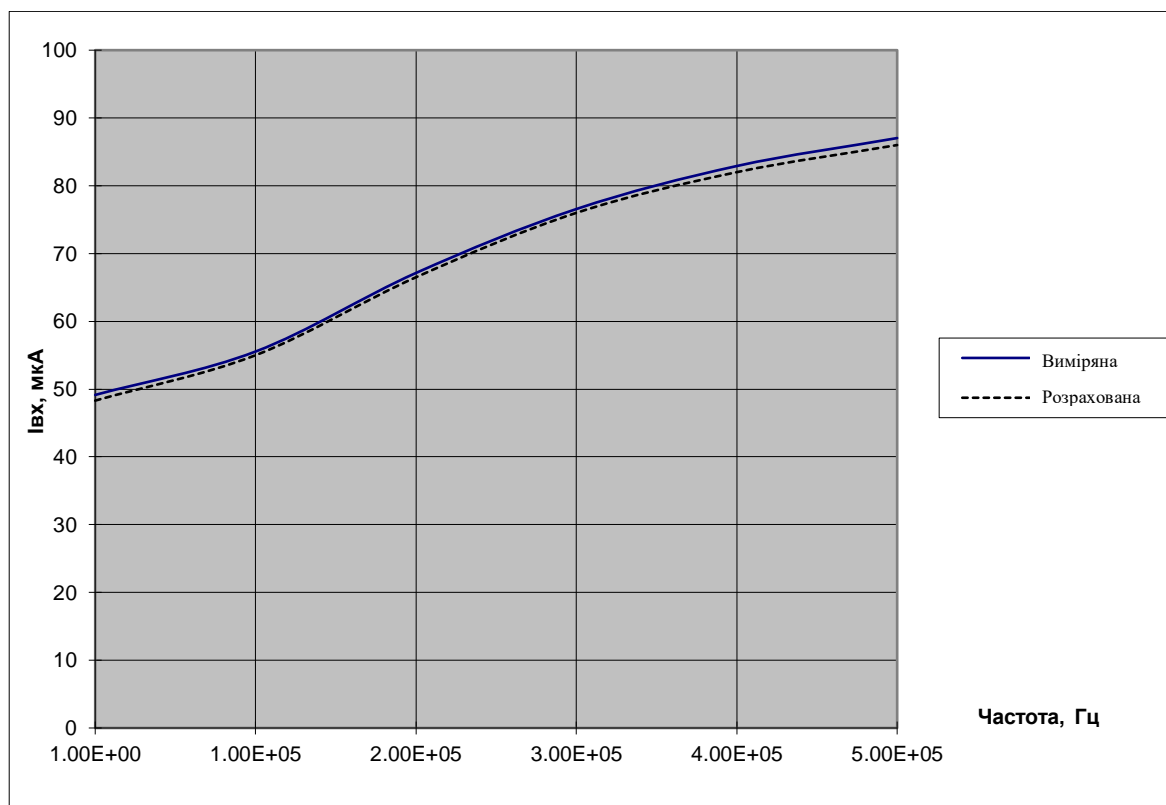


Рисунок А.2 - Частотна залежність вхідного току фільтра (Макет 1)

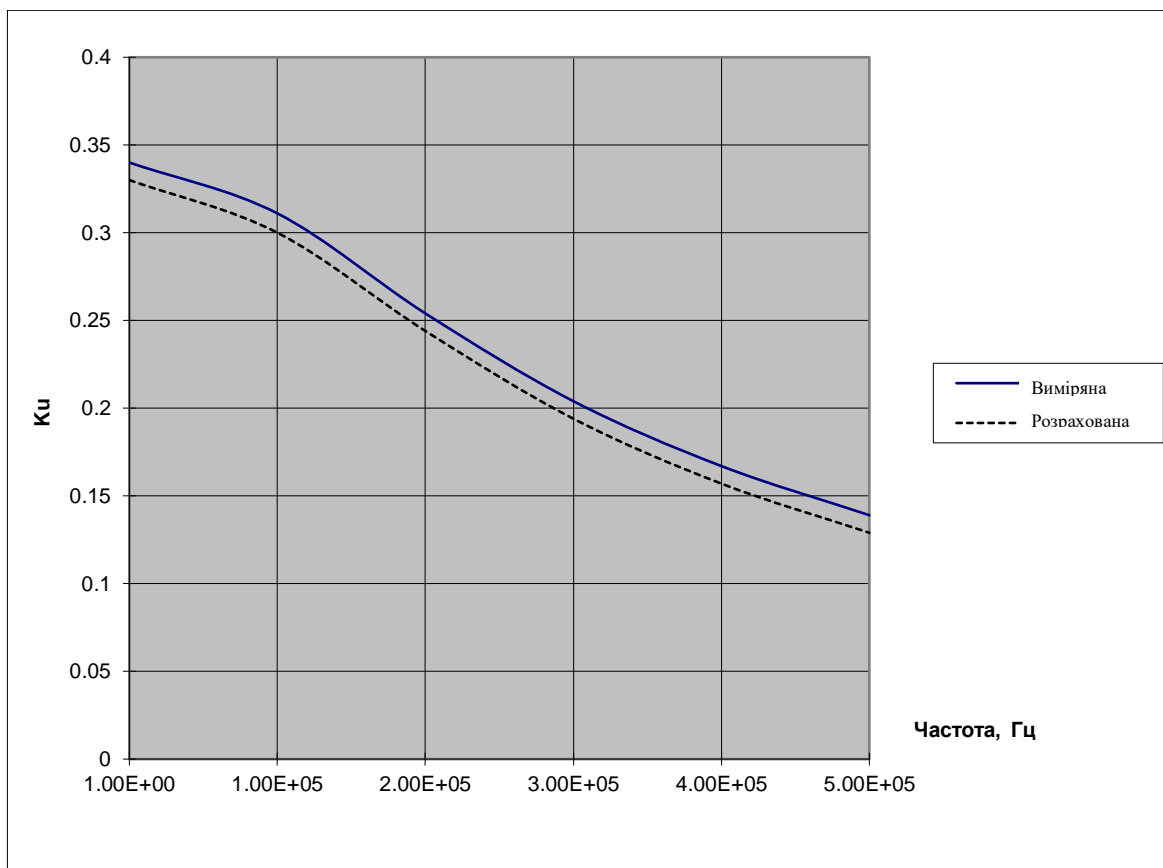


Рисунок А.3 - Амплітудно-частотна характеристика фільтра (Макет 2)

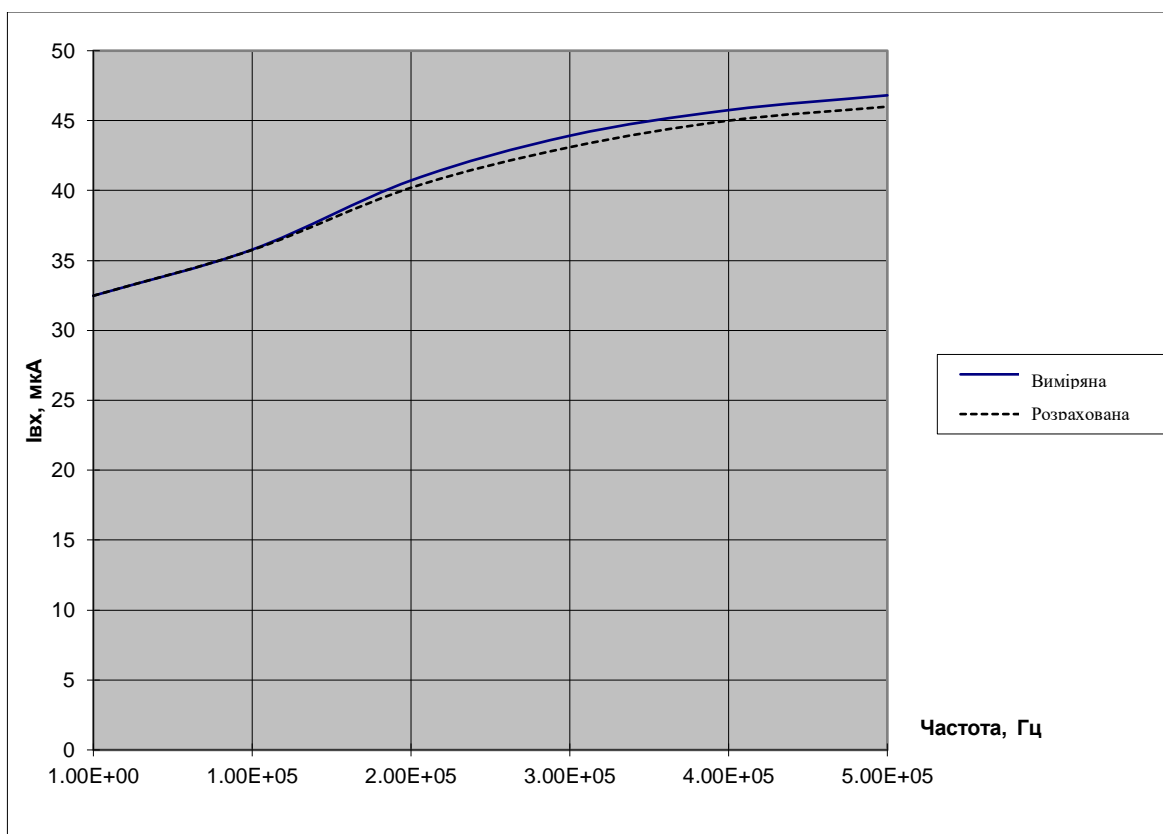


Рисунок А.4 - Частотна залежність вхідного току фільтра (Макет 2)

ДОДАТОК Б

VT1 KT315Г NE	3.5461E-03	на частоті	f = 234.4200E+03
R1	- 606.9500E-06	на частоті	f = 177.8300E+03
R3	505.6900E-06	на частоті	f = 112.2000E+03
R2	402.0300E-06	на частоті	f = 169.8200E+03
R4	- 366.9300E-06	на частоті	f = 190.5500E+03
C3	212.1000E-06	на частоті	f = 1.4454E+03
VT1 KT315Г CJC	- 211.8100E-06	на частоті	f = 44.6680E+06
VT1 KT315Г ISE	- 172.4400E-06	на частоті	f = 144.5400E+03
VT1 KT315Г IS	154.6100E-06	на частоті	f = 154.8800E+03
VT1 KT315Г BF	40.7100E-06	на частоті	f = 112.2000E+03
VT1 KT315Г RB	- 37.8190E-06	на частоті	f = 45.7090E+06
C2	4.2962E-06	на частоті	f = 1.4454
C1	4.1826E-06	на частоті	f = 1.4125
VT1 KT315Г CJE	- 774.8600E-09	на частоті	f = 100.0000E+06
VT1 KT315Г ISC	119.2100E-09	на частоті	f = 23.9880E+03
VT1 KT315Г TF	- 113.0100E-09	на частоті	f = 100.0000E+06
VT1 KT315Г BR	59.6050E-09	на частоті	f = 7.0795E+03
VT1 KT315Г NC	- 59.6050E-09	на частоті	f = 6.9183E+03
VT1 KT315Г TR	- 59.6050E-09	на частоті	f = 6.9183E+03
VT1 KT315Г ITF	- 59.6050E-09	на частоті	f = 6.9183E+03
VT1 KT315Г VTF	- 59.6050E-09	на частоті	f = 6.9183E+03

Рисунок Б.1 – Функції чутливості вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ по внутрішнім параметрам підсилювача

VT1 KT315Г NE	3.3328E-06	на частоті	f = 100.0000E+06
R1	- 584.5800E-09	на частоті	f = 100.0000E+06
R2	386.6700E-09	на частоті	f = 100.0000E+06
R4	- 358.2100E-09	на частоті	f = 100.0000E+06
R3	195.7200E-09	на частоті	f = 19.0550E+06
VT1 KT315Г CJC	180.9100E-09	на частоті	f = 19.0550E+06
VT1 KT315Г ISE	- 162.4000E-09	на частоті	f = 100.0000E+06
VT1 KT315Г IS	144.9400E-09	на частоті	f = 100.0000E+06
VT1 KT315Г RB	- 125.2600E-09	на частоті	f = 100.0000E+06
VT1 KT315Г CJE	60.5940E-09	на частоті	f = 100.0000E+06
VT1 KT315Г BF	38.1260E-09	на частоті	f = 100.0000E+06
C3	3.6930E-09	на частоті	f = 1.4791E+03
C1	339.3000E-12	на частоті	f = 1
VT1 KT315Г ISC	116.4200E-12	на частоті	f = 89.1250E+06
C2	- 58.2080E-12	на частоті	f = 33.8840E+06
VT1 KT315Г TF	58.2080E-12	на частоті	f = 100.0000E+06
VT1 KT315Г BR	58.2080E-12	на частоті	f = 33.8840E+06
VT1 KT315Г NC	- 58.2080E-12	на частоті	f = 33.8840E+06
VT1 KT315Г TR	- 58.2080E-12	на частоті	f = 33.8840E+06
VT1 KT315Г ITF	- 58.2080E-12	на частоті	f = 33.8840E+06
VT1 KT315Г VTF	- 58.2080E-12	на частоті	f = 33.8840E+06

Рисунок Б.2 – Функції чутливості вхідного току $I_{\text{вх}}$ по внутрішнім параметрам підсилювача

VT1 KT315Г NE	3.5457E-06	на частоті	f = 234.4200E+03
R1	- 606.7000E-09	на частоті	f = 194.9800E+03
R2	401.9800E-09	на частоті	f = 223.8700E+03
R4	- 366.8800E-09	на частоті	f = 194.9800E+03
R3	- 262.8700E-09	на частоті	f = 41.6870E+06
C3	212.0200E-09	на частоті	f = 1.4454E+03
VT1 KT315Г CJC	- 211.7000E-09	на частоті	f = 44.6680E+06
VT1 KT315Г ISE	- 172.4100E-09	на частоті	f = 173.7800E+03
VT1 KT315Г IS	154.6000E-09	на частоті	f = 524.8100E+03
VT1 KT315Г BF	40.6870E-09	на частоті	f = 91.2010E+03
VT1 KT315Г RB	- 37.8060E-09	на частоті	f = 44.6680E+06
C1	6.8867E-09	на частоті	f = 1
VT1 KT315Г CJE	- 771.2500E-12	на частоті	f = 100.0000E+06
C2	- 643.0100E-12	на частоті	f = 1.7783
VT1 KT315Г BR	58.2080E-12	на частоті	f = 33.8840E+06
VT1 KT315Г NC	- 58.2080E-12	на частоті	f = 33.8840E+06
VT1 KT315Г ISC	58.2080E-12	на частоті	f = 2.6303E+03
VT1 KT315Г TF	- 58.2080E-12	на частоті	f = 3.8019E+03
VT1 KT315Г TR	- 58.2080E-12	на частоті	f = 3.8019E+03
VT1 KT315Г ITF	- 58.2080E-12	на частоті	f = 3.8019E+03
VT1 KT315Г VTF	- 58.2080E-12	на частоті	f = 3.8019E+03

Рисунок Б.3 – Функції чутливості змінної складової току в колі живлення $I_{ж}$ ~ по внутрішнім параметрам підсилювача

VT1 KT315Г NE	- 1.000 E - 02
R1	1.798 E - 03
R2	- 1.136 E - 03
R4	1.057 E - 03
VT1 KT315Г ISE	4.840 E - 04
VT1 KT315Г IS	- 4.345 E - 04
VT1 KT315Г BF	- 1.140 E - 04
VT1 KT315Г RB	1.068 E - 07
VT1 KT315Г ISC	- 1.971 E - 08
VT1 KT315Г NC	1.971 E - 08
R3	3.530 E - 11
VT1 KT315Г BR	5.185 E - 13
VT1 KT315Г CJC	0
VT1 KT315Г CJE	0
C1	0
C2	0
C3	0
VT1 KT315Г TF	0
VT1 KT315Г TR	0
VT1 KT315Г ITF	0
VT1 KT315Г VTF	0

Рисунок Б.4 – Функції чутливості постійного току живлення $I_{ж}$ по внутрішнім параметрам підсилювача

Таблиця Б.1 - Розраховані значення діагностуємих параметрів ППЧ та їх задані значення при моделюванні експерименту

Параметр	НОМІНАЛЬНІ			В допусках			Вихід за допуск		
	Задан.	Розр.	Похиб %	Задан.	Розр.	Похиб %	Задан.	Розр.	Похиб %
R1,Ом	43 000	43 173	0.402	40 000	40 092	0.23	37 000	37 139	0.38
R2,Ом	27 000	26 808	0.711	25 000	25 151	0.6	28 000	28 059	0.21
R3,Ом	1 000	999.8	0.02	950	949.73	0.029	1 050	1 049	0.095
R4,Ом	510	510.02	0.004	500	501.31	0.26	510	509.98	0.39
C1,мкФ	10	10.019	0.19	11	11.054	0.49	10	10.02	0.2
C2,мкФ	5	4.999	0.02	5	5.003	0.06	5	4.999	0.02
C3,мкФ	10	10.004	0.04	9	8.925	0.83	7	7.024	0.34
RB,Ом	3	2.990	0.33	3	2.98	0.67	2.9	2.89	0.34
IS,10-15	23.68	23.67	0.04	23.68	23.71	0.13	3.68	23.72	0.17
BF	300	299.9	0.03	295	295.3	0.1	300	299.9	0.03
ISE,10-15	23.68	23.67	0.04	24	23.97	0.1	3.68	23.71	0.13
NE	1.206	1.212	0.5	1.2	1.208	0.67	1.2	1.203	0.25
CJC,пФ	7	7.002	0.036	8	8.0124	0.16	10	9.985	0.15
CJE,пФ	10	9.999	0.01	10	9.977	0.23	10	9.982	0.18

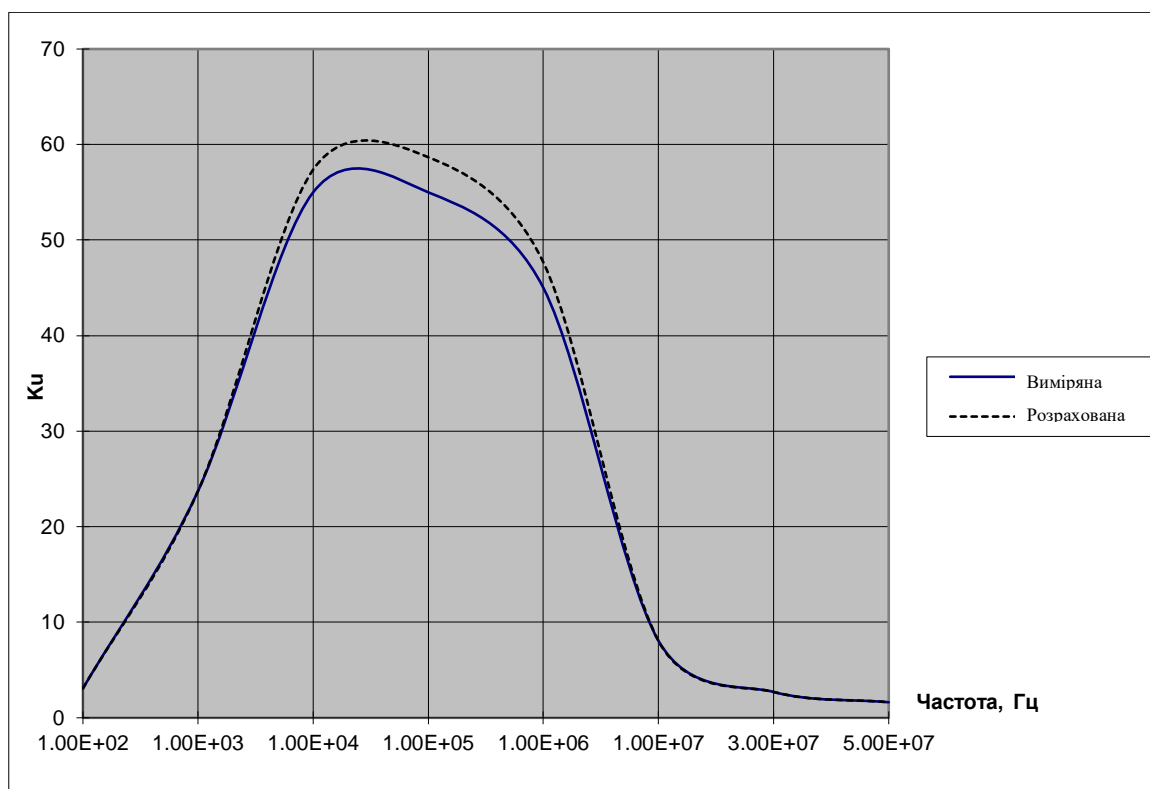


Рисунок Б.5 - Амплітудно-частотна характеристика ППЧ (Макет 1)

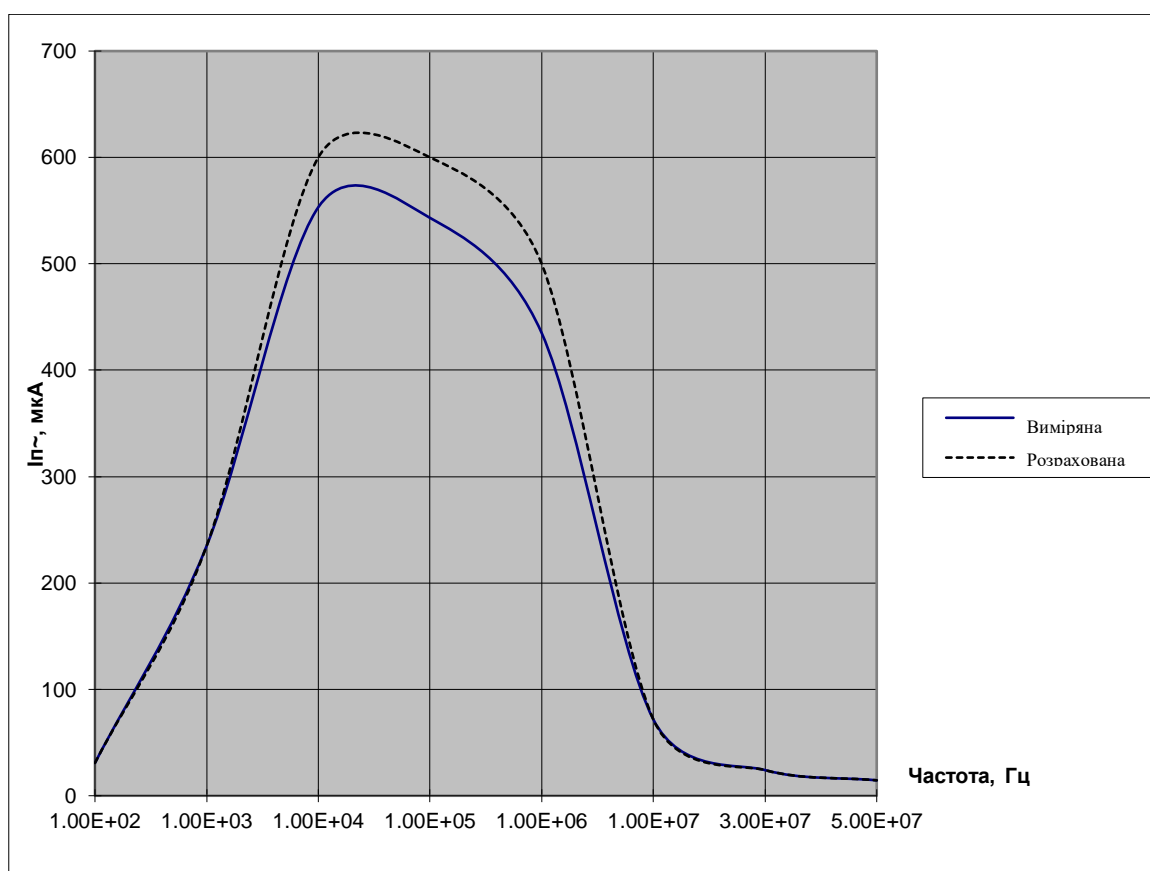


Рисунок Б.6 - Частотна залежність змінної складової току в колі живлення ППЧ (Макет 1)

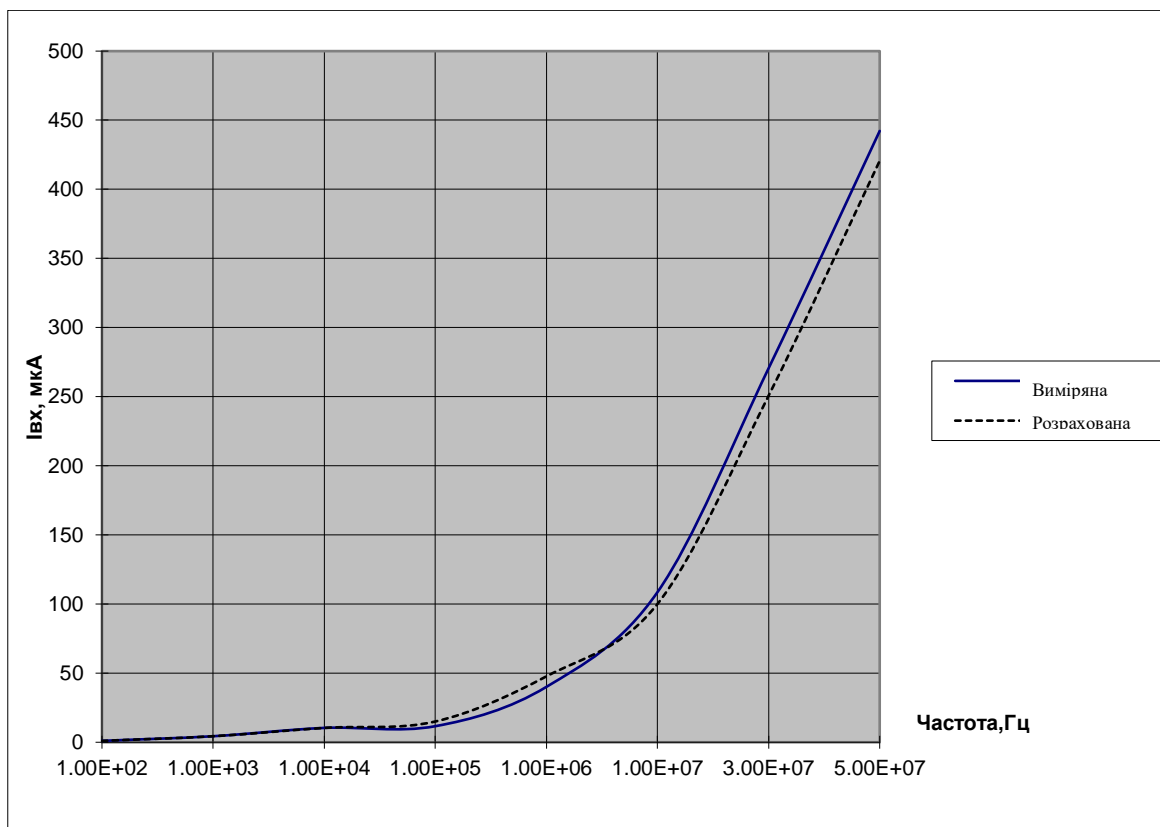


Рисунок Б.7 - Частотна залежність вхідного току ППЧ (Макет 1)

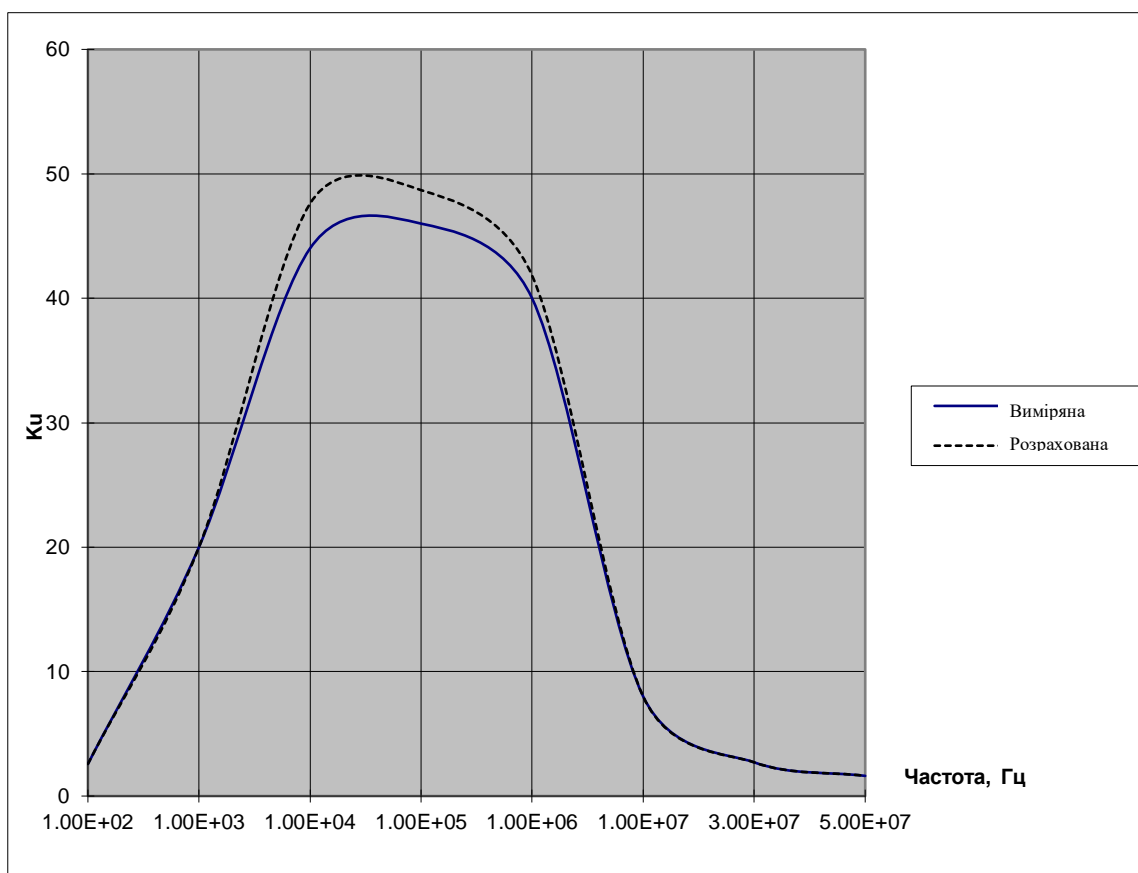


Рисунок Б.8 - Амплітудно-частотна характеристика ППЧ (Макет 2)

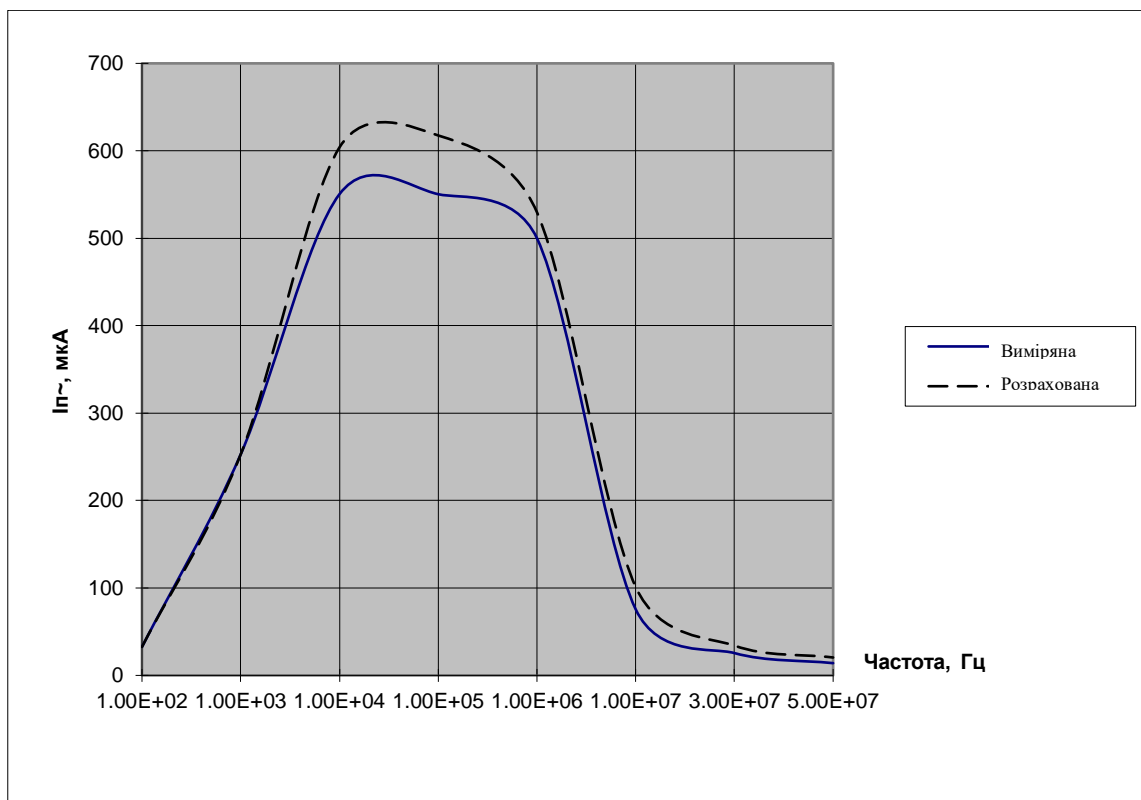


Рисунок Б.9 - Частотна залежність змінної складової току в колі живлення ППЧ (Макет 2)

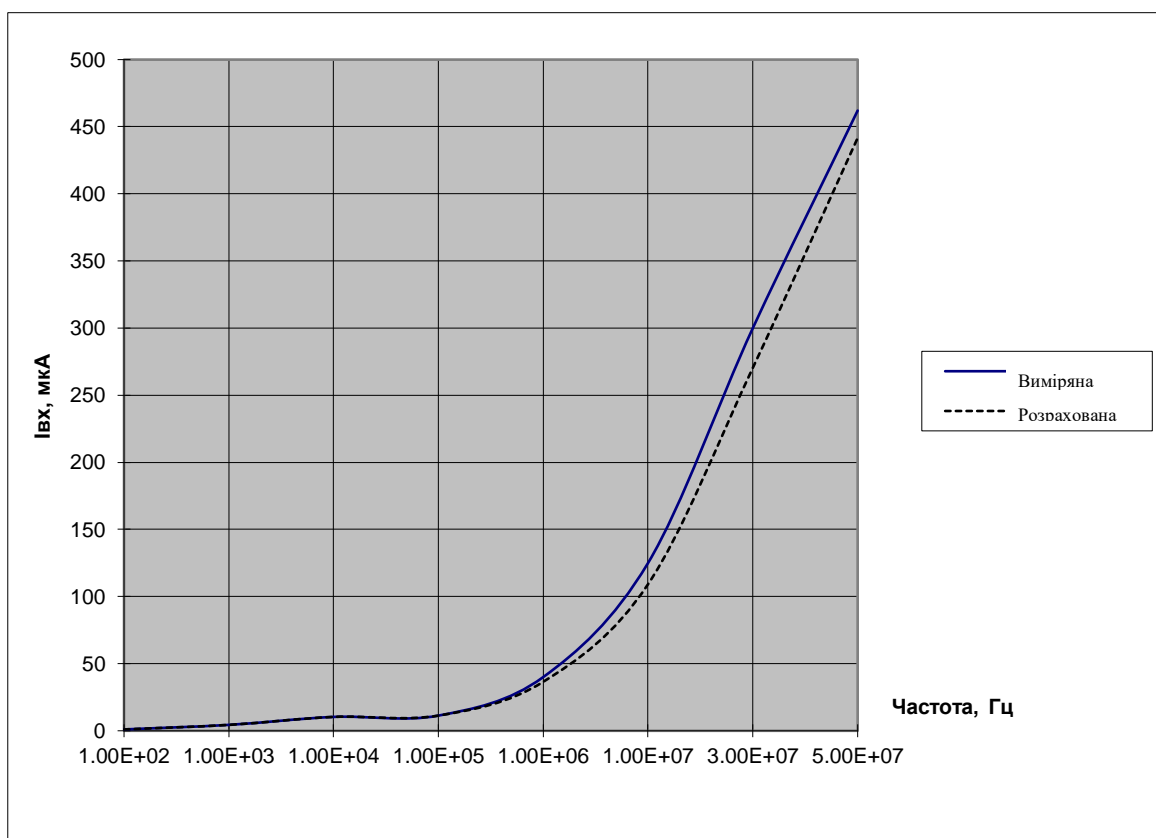


Рисунок Б.7 - Частотна залежність вхідного току ППЧ (Макет 2)

Таблиця Б.2 - Розраховані значення діагностуємих параметрів ППЧ та їх виміряні значення при експерименті

Параметр	Гранично-доп.зн-я		Макет1 (справний)			Макет2 (несправний)		
	Нижнє	Верхнє	Задан.	Розр.	Похиб %	Задан.	Розр.	Похиб%
R1,Ом	38 700	47 300	42 877	41 020	4.33	42 877	41 322	3.63
R2,Ом	24 300	29 700	26 919	26 924	4.69	26 919	28 235	4.89
R3,Ом	900	1 100	1 001	961.96	3.9	821.7	786.37	4.3
R4,Ом	459	561	509	499.33	1.9	509	497.84	2.19
C1,мкФ	8	12	10.7	11.033	3.11	6.94	7.19	3.69
C2,мкФ	4	6	4.8	4.93	2.7	4.8	5.011	4.39
C3,мкФ	8	12	10.8	10.41	3.61	10.8	10.33	4.35
RB,Ом	2.1	4.3	3.7	3.86	4.2	3.7	3.61	2.43
IS,10-15	22.35	25.67	24.53	23.46	4.38	24.53	23.92	2.5
BF	270	318	295	305.6	3.6	295	304.2	3.12
ISE,10-15	22.35	25.67	25.07	24.59	1.9	25.07	23.98	4.35
NE	1.2	1.21	1.204	1.208	0.33	1.204	1.206	0.17
CJC,пФ	5	9.3	9.1	8.909	2.09	9.1	8.875	2.47
CJE,пФ	7.6	12.9	12.6	12.72	0.95	12.6	12.44	0.16

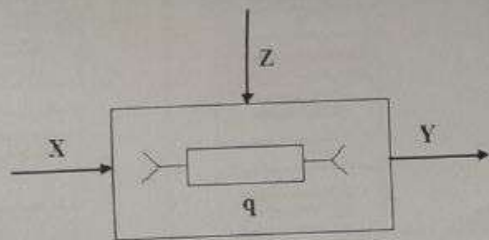


Рисунок 1 - Узагальнене зображення системи, що діагностується

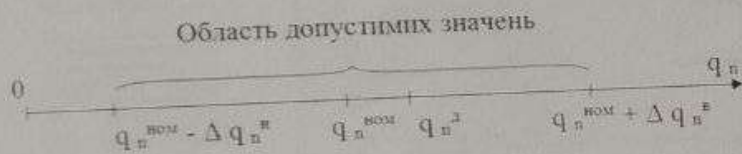


Рисунок 2 - Область можливих значень параметра q_n
 $q_n^ном$ - номінальне значення n-го внутрішнього параметра;
 Δq_n^n , Δq_n^n - нижній та верхній допуски на n-й внутрішній параметр;
 $q_n^д$ - дійсне значення n-го внутрішнього параметра.

$$\begin{cases} q_1^ном - \Delta q_n^n \leq q_1^ном \leq q_1^ном + \Delta q_n^n \\ q_2^ном - \Delta q_n^n \leq q_2^ном \leq q_2^ном + \Delta q_n^n \\ \dots \\ q_n^ном - \Delta q_n^n \leq q_n^ном \leq q_n^ном + \Delta q_n^n \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} R_1^д \leq R_1^доп \\ R_2^д \leq R_2^доп \\ \dots \\ R_k^д \leq R_k^доп \end{cases} \quad (1.2)$$

де $R_1^д, R_2^д, \dots, R_k^д$ - дійсні значення 1, 2, ..., k-го режимів роботи елемента;
 $R_1^доп, R_2^доп, \dots, R_k^доп$ - гранично-допустимі значення 1, 2, ..., k-го режимів роботи елемента.

Рисунок 3 - Умови відсутності даного виду дефектів у системі, що діагностується

				13.02070849.00018 П.л. 1		
Вн.	Дист.	М.р. Дем.п.	Підп.	Комп'ютерна система: діагностування внутрішніх параметрів технічних систем		
Розроб.	Касичук А.М.					
Програ.	Сарватський С.Ю.			Постановка завдання дипломної роботи		
Узгодж.						
Програ.	Шарбана П.В.			Архив 1 Архив 1		
Контр.	Кулішова Т.В.					
				НУЗП КНТЗ-511М		

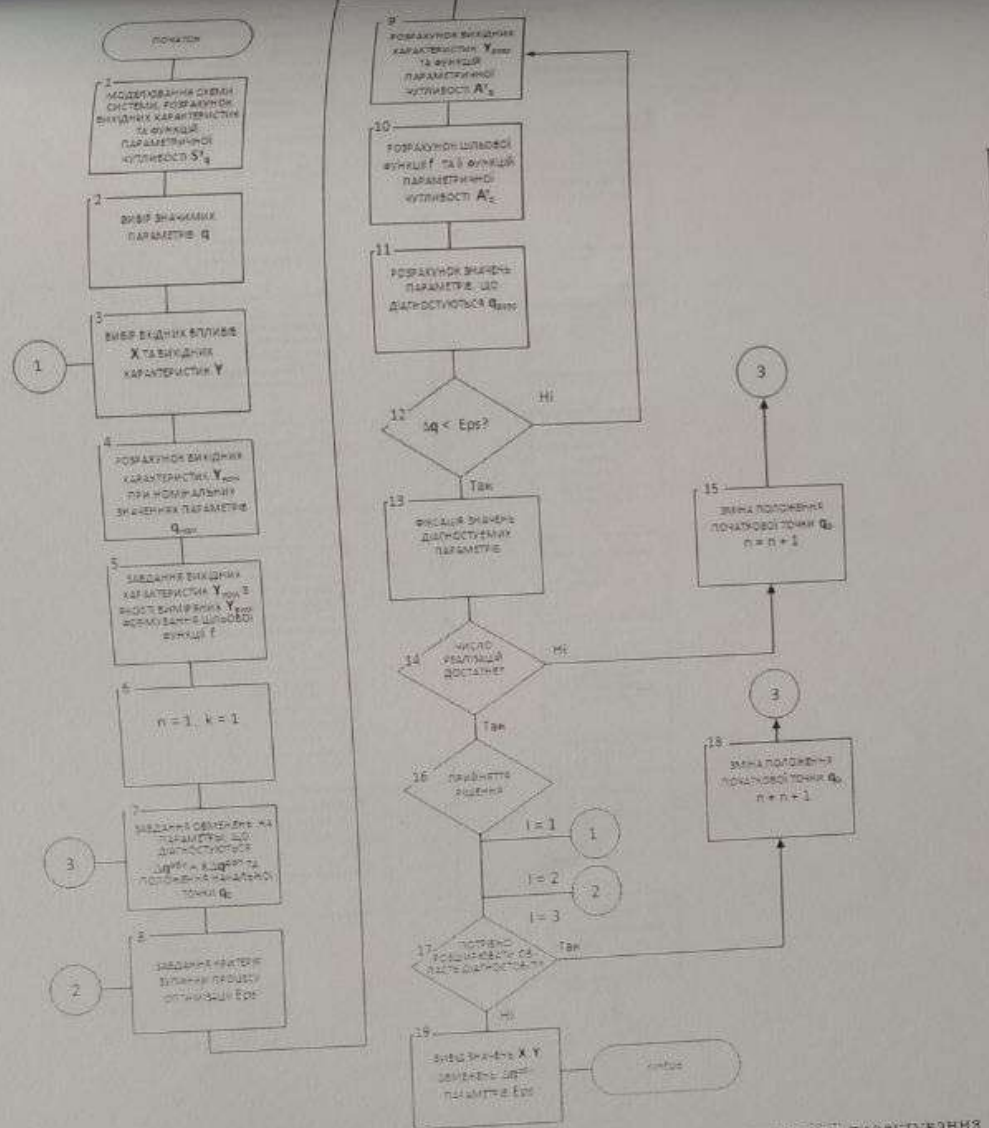


Рисунок 1 - Алгоритм забезпечення діагностовності технічної системи на стадії її проектування

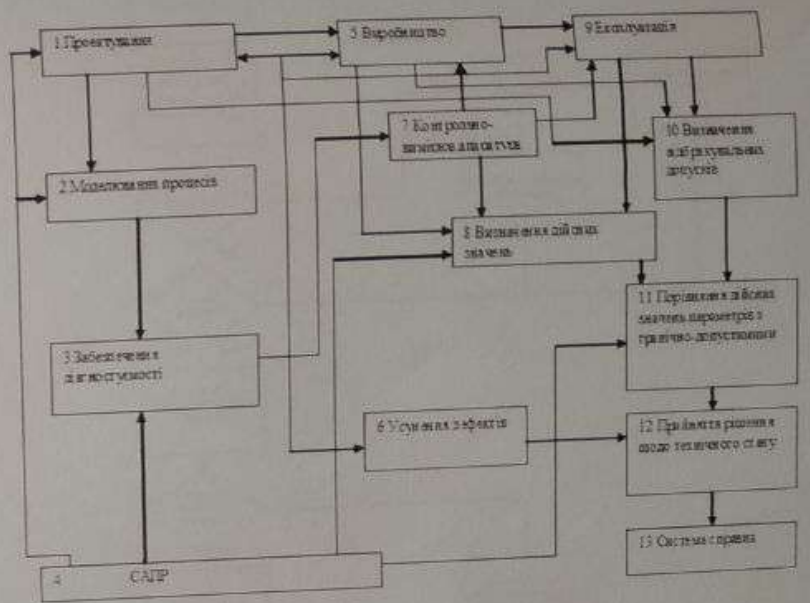
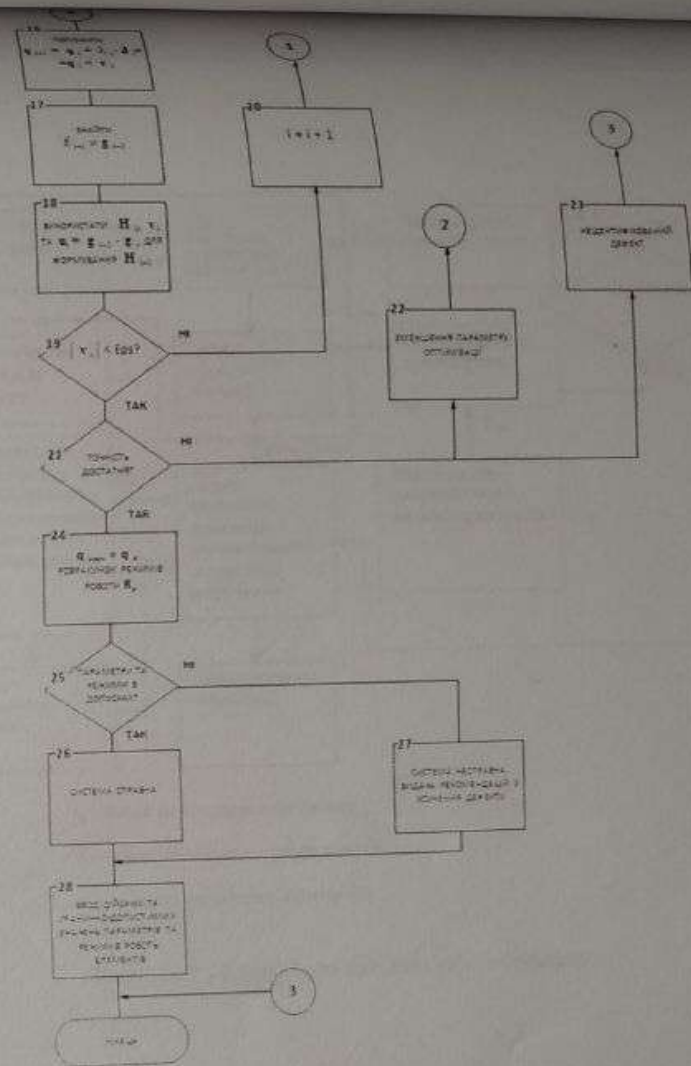
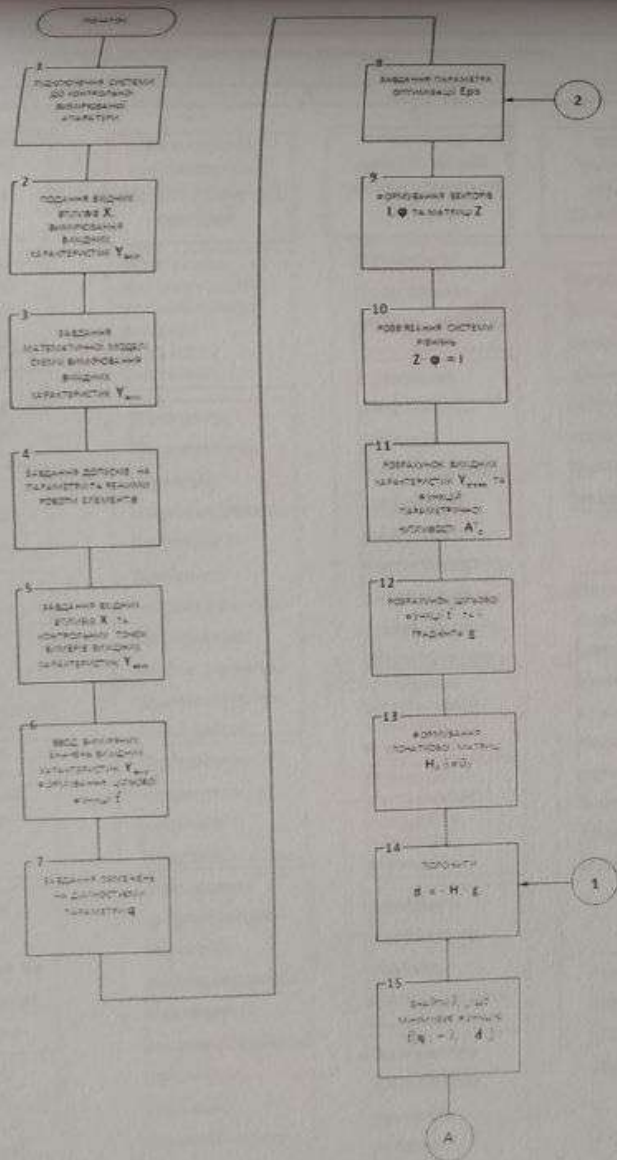


Рисунок 2 - Блок-схема методу автоматизованого діагностування

13.02070849.00018 ПЛ.2

					Дит	Міся	Місяц
Комп'ютерна система діагностування внутрішніх параметрів технічних систем							
Метод автоматизованого діагностування на основі забезпечення діагностовності системи							
№	Ім'я	№ Інвент.	Підп.	Дат.	Архив 1	Архив 2	
Розроб.	Антон К.М.		<i>[Signature]</i>				
Проєкт.	Савицький С.С.		<i>[Signature]</i>				
Проєкт.	Шарко В.В.		<i>[Signature]</i>				
Дат.	Квітень 2014						
					НУЗП/НТ/50114		



13.02070849.00018 A1				
Компьютерная система бизнес-планирования внутренних параметров технических систем				
Алгоритм бизнес-планирования внутренних параметров технических систем				
Изм.	Изд.	№ документа	Подпись	Дата
		Корень А.М.	<i>[Signature]</i>	
		Сидурский С.Ю.	<i>[Signature]</i>	
		Получено 11.05.2014	<i>[Signature]</i>	
		Выпущено 11.05.2014	<i>[Signature]</i>	
			Лист	Масштаб
			Архив 1	Архив 2
НУЗП КНТЗ-5114				

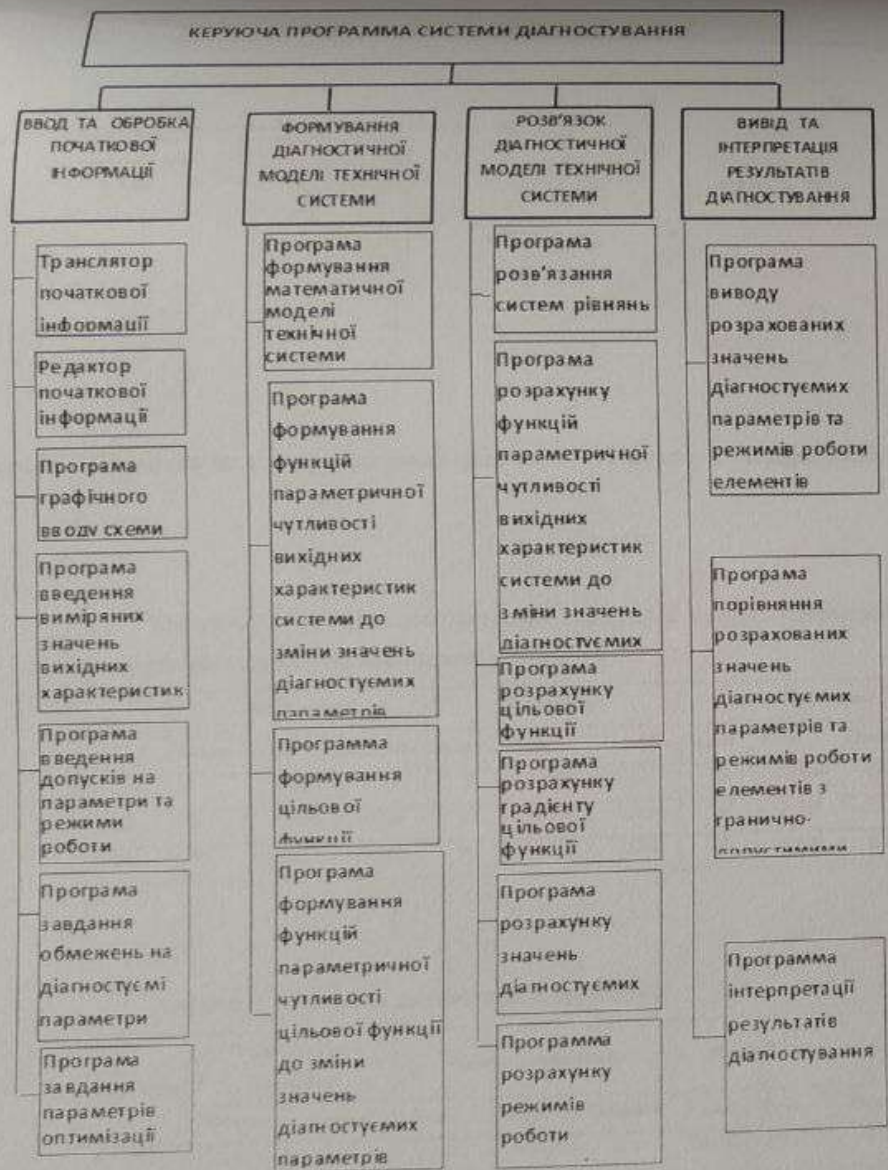
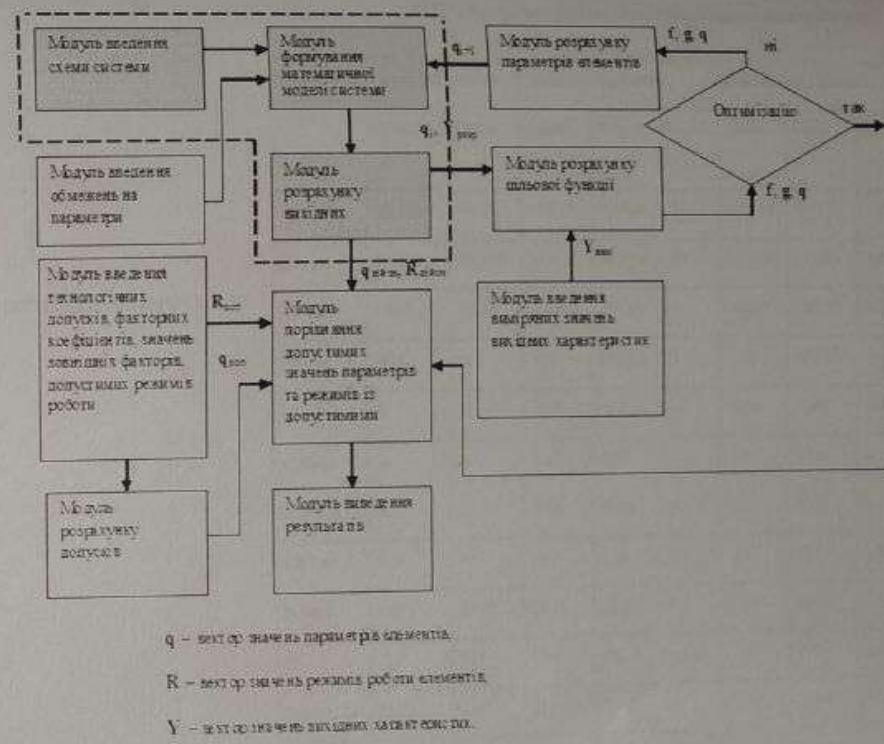


Рисунок 1 - Склад комп'ютерної системи діагностування



q – вектор значень параметрів елементів.
 R – вектор значень режимів роботи елементів.
 Y – вектор значень вихідних характеристик.

Рисунок 2 - Блок-схема системи діагностування

13.02070849.00018 ПЛ.3			
№	Лист	№	Лист
Розробник	Мельник С.М.	Технік	
Перевірник	Саргсєєв С.Ю.		
Конструктор			
Начальник бюро	Мельник С.М.		
Контроль			
Комп'ютерна система діагностування внутрішніх параметрів технічних систем. Структура та склад комп'ютерної системи діагностування.			
		Лист	Макс
		Аркуші 1	Аркуші 1
НУЗП КНТЗ-511М			

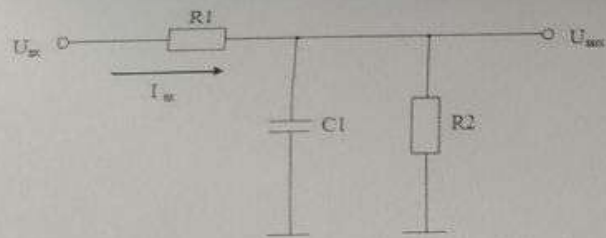


Рисунок 1 - Принципова електрична схема фільтра

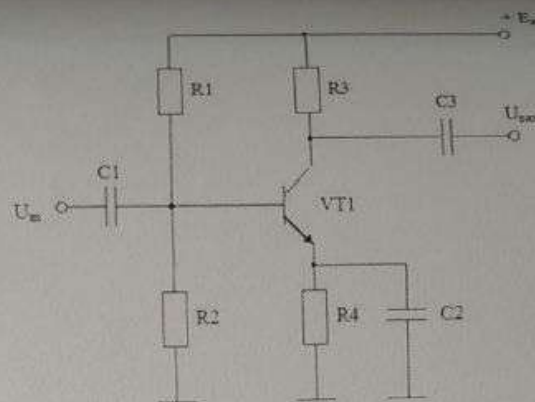


Рисунок 2 - Принципова електрична схема підсилювача

Таблиця 1 - Значення діагностуємих параметрів на етапі забезпечення діагностовності (моделювання експерименту)

Параметр	Номинальні			В допусках			Вихід за допуск		
	Задан	Розр	Похиб%	Задан	Розр	Похиб%	Задан	Розр	Похиб%
R1, Ом	10	9.999	0.01	9	8.999	0.011	15	14.999	0.007
R2, Ом	10	9.999	0.01	11	10.999	0.009	10	9.999	0.01
C1, пФ	100	99.998	0.002	90	89.999	0.001	10	9.996	0.04

Таблиця 2 - Значення діагностуємих параметрів

Параметр	Гранич. доп. значення		Макет 1 (справний)			Макет 2 (несправний)		
	Нижче	Верше	Задан	Розр	Похиб%	Задан	Розр	Похиб%
R1, кОм	9	11	10.22	10.48	2.5	20.32	20.71	1.9
R2, кОм	9	11	10.13	9.93	1.9	10.47	10.25	2.1
C1, пФ	80	120	100.5	102.8	2.3	102.3	104.9	2.5

Таблиця 3 - Розраховані значення діагностуємих параметрів ППЧ та їх виміряні значення при експерименті

Параметр	Гранично-доп. знач.		Макет 1 (справний)			Макет 2 (несправний)		
	Нижче	Верше	Задан	Розр	Похиб %	Задан	Розр	Похиб%
R1, Ом	38.700	47.300	42.877	41.020	4.33	42.877	41.322	3.63
R2, Ом	24.300	29.700	26.919	26.924	+69	26.919	28.235	4.89
R3, Ом	960	1.100	1.001	961.96	1.9	821.7	786.37	4.3
R4, Ом	459	561	509	499.33	1.9	509	497.84	2.19
C1, мкФ	8	12	10.7	11.033	1.11	6.94	7.19	3.69
C2, мкФ	4	6	4.8	4.93	2.7	4.8	5.011	4.39
C3, мкФ	8	12	10.8	10.41	3.61	10.8	10.33	4.35
RV, Ом	2.1	4.3	3.7	3.86	4.2	3.7	3.61	2.48
IS, 10-15	22.35	25.67	24.53	23.46	4.35	24.53	23.92	2.5
BF	270	318	295	305.6	3.6	295	304.2	3.10
ISE, 10-15	22.35	25.67	25.07	24.59	1.9	25.07	23.95	4.35
NE	1.2	1.21	1.204	1.208	0.33	1.204	1.206	0.17
CT, пФ	5	9.3	9.1	8.809	2.04	9.1	8.875	2.47
CPE, пФ	7.6	12.9	12.8	12.72	0.90	12.6	12.44	0.16

13.02070849.00018 П.4

Комп'ютерна система
діагностування внутрішніх
параметрів технічних систем

Експериментальна перевірка
результатів роботи

Ім'я	Піст	№ Дов. С.	Підп.	Дат.	Ім.	Маса	Масштаб
Віраш	Катал	№ 3	Савицький С.Ф.				
Шерш					Архив 1		
Гашин					Архив 2		
Миколюк	Шерш	№ 10			НУЗП КНТЗ-511М		
Чин	Відом	№ 1					